

引用格式:毛光周,孟令强,刘晓通,等. 沂沭断裂带中段南小尧金矿地球化学特征及矿床成因探讨[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(3):1-13.

MAO Guangzhou, MENG Lingqiang, LIU Xiaotong, et al. Geochemical characteristics and ore genesis of Nanxiaoyao gold deposit in central Yishu fault zone, Shandong province[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(3): 1-13.

沂沭断裂带中段南小尧金矿地球化学特征及矿床成因探讨

毛光周^{1,2,3}, 孟令强^{1,3}, 刘晓通^{1,4}, 安鹏瑞¹, 王向军^{1,5}, 何铁良¹, 宋立国¹, 窦义鑫¹

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 266237;

3. 国土资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室和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;

4. 威海昊阳集团有限责任公司, 山东 威海 264200; 5. 兖州煤业股份有限公司 兴隆庄煤矿, 山东 济宁 272100)

摘 要:以沂沭断裂带中段南小尧金矿为研究对象,利用成矿期含金硫化物的地球化学特征探讨了南小尧金矿矿床成因。黄铁矿 S/Fe、Fe/(S+As)、Au/Ag 比值显示南小尧金矿形成于中深部的中低温环境;黄铁矿 Co-Ni 与 Co-Ni-As 图解表明南小尧金矿床的形成与岩浆活动关系密切,在后期可能经历了结晶后热液改造,成矿热液主要为火山与次火山热液;硫化物的硫同位素值介于 -3.2‰ ~ 2.9‰ ,显示硫的深源特征。综合分析认为,中生代熔融的岩浆以及火山与次火山热液沿沂沭断裂带上涌,为金矿的形成带来了大量成矿物质和成矿流体,在中深部的成矿环境中随成矿条件的改变使 Au 在适宜的构造位置富集并沉淀成矿。

关键词:成矿物质;成矿流体;地球化学;矿床成因;金矿床;沂沭断裂带

中图分类号:P595;P611.3⁺¹

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2019)03-0001-13

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2019.03.001

Geochemical characteristics and ore genesis of Nanxiaoyao gold deposit in central Yishu fault zone, Shandong province

MAO Guangzhou^{1,2,3}, MENG Lingqiang^{1,3}, LIU Xiaotong^{1,4}, AN Pengrui¹,

WANG Xiangjun^{1,5}, HE Tieliang¹, SONG Liguol¹, DOU Yixin¹

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology,

Qingdao, Shandong 266237, China; 3. Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resource Utilization

Subordinated to the Ministry of Land and Resources and Key Laboratory of Metallogenic Geological

Process and Resources Utilization in Shandong Province, Jinan, Shandong 250013, China;

4. Weihai Haoyang Group Company Limited, Weihai, Shandong 264200, China;

5. Xinglongzhuang Coal Mine, Yanzhou Coal Mining Company Limited, Jining, Shandong 272100, China)

收稿日期:2018-09-08

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和山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室项目(2013003);国家重点研发计划深地资源勘查开采重点专项(2016YFC0601001)

作者简介:毛光周(1978—),男,甘肃甘谷人,副教授,博士,主要从事岩矿地球化学、能源地质方面的教学与研究工作。

E-mail:gzmaonjunwu@163.com

Abstract: Taking Nanxiaoyao gold deposit in central region of Yishu fault zone as the research object, this paper explored the ore genesis of the gold deposit by analyzing the geochemical characteristics of the gold-bearing sulfides during the ore-forming period. The S/Fe, Au/Ag and Fe/(S+As) ratios of pyrite indicates that the gold deposit was formed in medium depth and medium-low temperature environment. As the diagrams of Co-Ni and Co-Ni-As shows, the formation of the gold deposit could be closely linked with magmatic activities, and may have undergone post-crystal hydrothermal reformation in later stages; and the main ore-forming hydrothermal fluids are mainly volcanic and subvolcanic hydrothermal. The sulfur isotope values of the sulfide range from -3.2‰ to 2.9‰ , showing the characteristics of deep sulfur sources. In summary, the Mesozoic melted magma and the volcanic and subvolcanic hydrothermal fluids surged along the Yishu fault zone, bringing a large volumes of ore-forming materials and ore-forming fluids to the formation of gold deposit. In addition, the metallogenic conditions changed, the gold deposit was enriched and precipitated in the appropriate structural locations in medium-deep metallogenic environment.

Key words: ore-forming material; ore-forming fluid; geochemistry; ore genesis; gold deposit; Yishu fault zone

沂沭断裂带是郯庐断裂带在山东境内的部分,是划分鲁东、鲁西两个地质构造单元的区域性切幔断裂,控制着区域内的沉积建造、岩浆活动和成矿,对金矿具有明显的控制作用^[1-3](图1)。在沂沭断裂带中段分布有龙泉站、牛家小河、南小尧等中小型金矿^[1],金矿成矿受多种因素影响,其主导因素可能为富含金质的基底矿源层、晋宁期韧性剪切作用以及燕山期的火山-岩浆活动^[1,4-5]。目前,对沂沭断裂带中段金矿成矿物质来源的认识主要有:①成矿物质主要来源于深部岩浆^[1-2,5],中生代构造伸展使软流圈携带成矿物质沿断裂向上侵入,也带来成矿作用的热量;②成矿物质来源于变质基底岩系^[4,6],沂沭断裂带中段变质基底岩系具有较高的Au丰度,可能为金成矿的母岩。在成矿流体上的认识主要有:①成矿流体主要来源于地壳,大气降水后期参与成矿作用^[5-6];②成矿热液主要为与中生代岩浆活动密切相关的岩浆热液^[1-2,4],大气降水影响其成矿过程;③金矿化过程有与早寒武纪变质沉积作用有关的变质热液的参与^[7]。成矿物质来源、成矿流体来源及性质对揭示矿床成因具有重要意义,与成矿作用相关元素的地球化学特征可对成矿物质的来源示踪,用来判断成矿流体的来源及性质^[8-11]。本研究以沂沭断裂带中段南小尧金矿成矿期硫化物为研究对象,采用LA-ICP-MS原位测试方法,分析硫化物微量元素及硫同位素地球化学特征,判断南小尧金矿的成矿流体性质、示踪成矿流体并探讨成矿物质的来源及矿床成因,对沂沭断裂带中段金矿的勘探与深部预测工作具有重要的理论指导和借鉴意义。

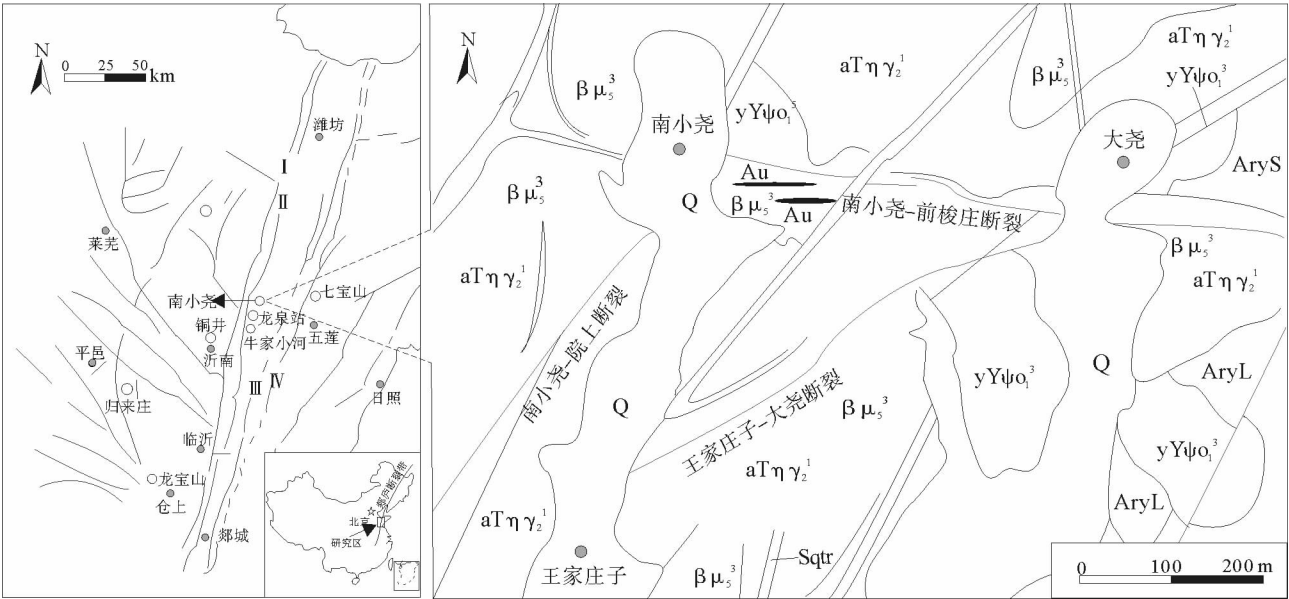
1 区域地质背景及矿床地质特征

1.1 区域地质背景

南小尧金矿地处沂沭断裂带中段汞丹山凸起之上,位于沂水-汤头断裂的东缘^[1-2,4](图1(a))。沂沭断裂带内发育四条NNE向主干断裂,自西向东分别为郯郯-葛沟断裂、沂水-汤头断裂、安丘-莒县断裂以及昌邑-大店断裂,并与广泛发育的NNE-NE向及NW向次级断裂一起,构成了复杂的断裂构造系统^[1]。研究区位于受沂水-汤头断裂控制的脆-韧性构造带中,赋矿围岩主要为古元古代花岗岩,小规模燕山期花岗岩、脉岩较为发育,构造活动较为强烈^[2]。

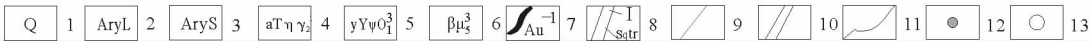
1.2 矿床地质特征

南小尧金矿区内岩浆岩分布较为广泛,具有多期次侵入特征。中生代岩体零星分布,规模较小,其中脉岩较为发育。太古代沂水岩群、泰山岩群呈包体形式出露于变质变形的侵入岩中^[1-2](图1(b)、图2)。矿区脆性断裂较发育,有南小尧-前梭庄断裂、大尧-王家庄子断裂、南小尧-院上断裂,其中南小尧-前梭庄断裂为矿区主要控矿构造^[2,4]。南小尧金矿床矿石类型主要为碎裂岩矿石、绿片岩矿石和石英-硫化物矿石(图3(a)-3(c)),矿石具有不同程度的糜棱岩化、碎裂岩化,以及较明显的硅化、绿泥石化、碳酸盐化等矿石蚀变现象(图4(a)-4(d))。研究区位于南小尧-前梭庄断裂西段,金矿床产于基底变质变形花岗岩中^[2,4](图1(b)、图2)。由矿床北部至南部,分别为Ⅰ号矿化带、Ⅱ号矿化带,两条矿化带均呈EW走向,距离约为55 m^[2]。Ⅰ号矿化带为糜棱岩带,其展布方向 $96^{\circ}\sim 276^{\circ}$,倾向SSW,从上部至下部,倾向角由陡逐渐变缓,倾向角约为 $65^{\circ}\sim 72^{\circ}$,



(a) 沂沭断裂带中段金矿分布图

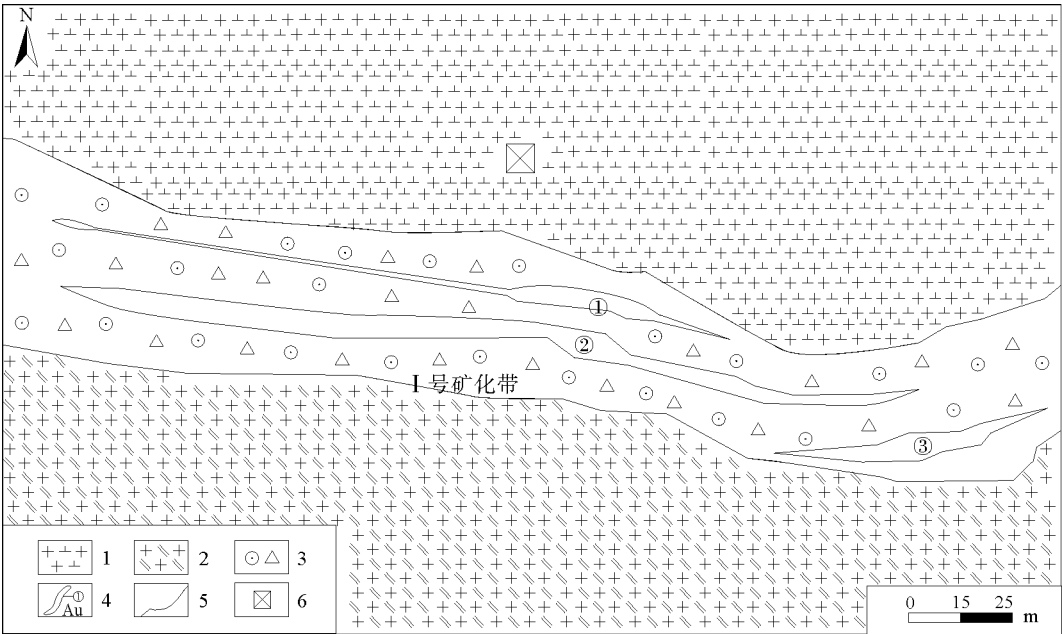
(b) 南小尧金矿地质图



I: 郯部—葛沟断裂; II: 沂水—汤头断裂; III: 安丘—莒县断裂; IV: 昌邑—大店断裂;
1—第四系; 2—中太古代含透辉斜长角闪岩; 3—中太古代二辉麻粒岩; 4—古元古代二长花岗岩; 5—中太古代含透辉石角闪岩;
6—辉绿岩; 7—金矿体及编号; 8—绢英岩化碎裂带; 9—断裂; 10—角砾岩带; 11—地质界线; 12—地名; 13—金矿床

图 1 山东沂沭断裂带中段构造位置图^[1,5]

Fig. 1 Structural map of the middle of Yishu fault zone, Shandong province

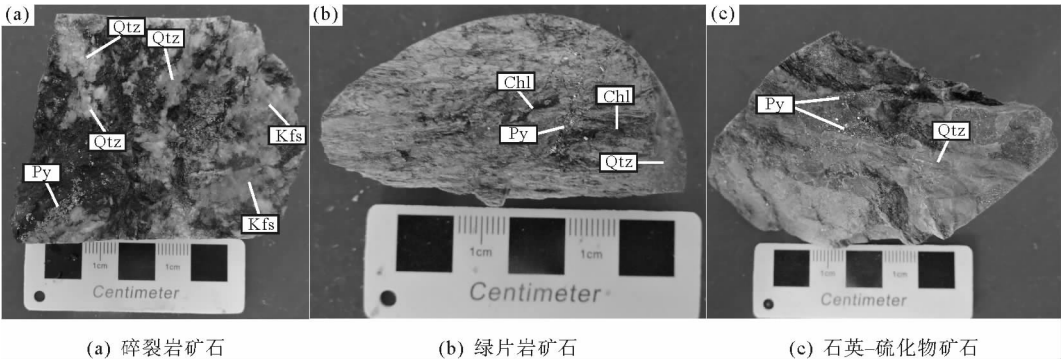


1—古元古代花岗闪长岩; 2—古元古代二长花岗岩; 3—破碎蚀变带; 4—金矿体及其编号; 5—地质界限; 6—竖井位置

图 2 南小尧金矿床+30 m 中段平面图^[2]

Fig. 2 Geological map at +30 m level in Nanxiaoyao gold deposit

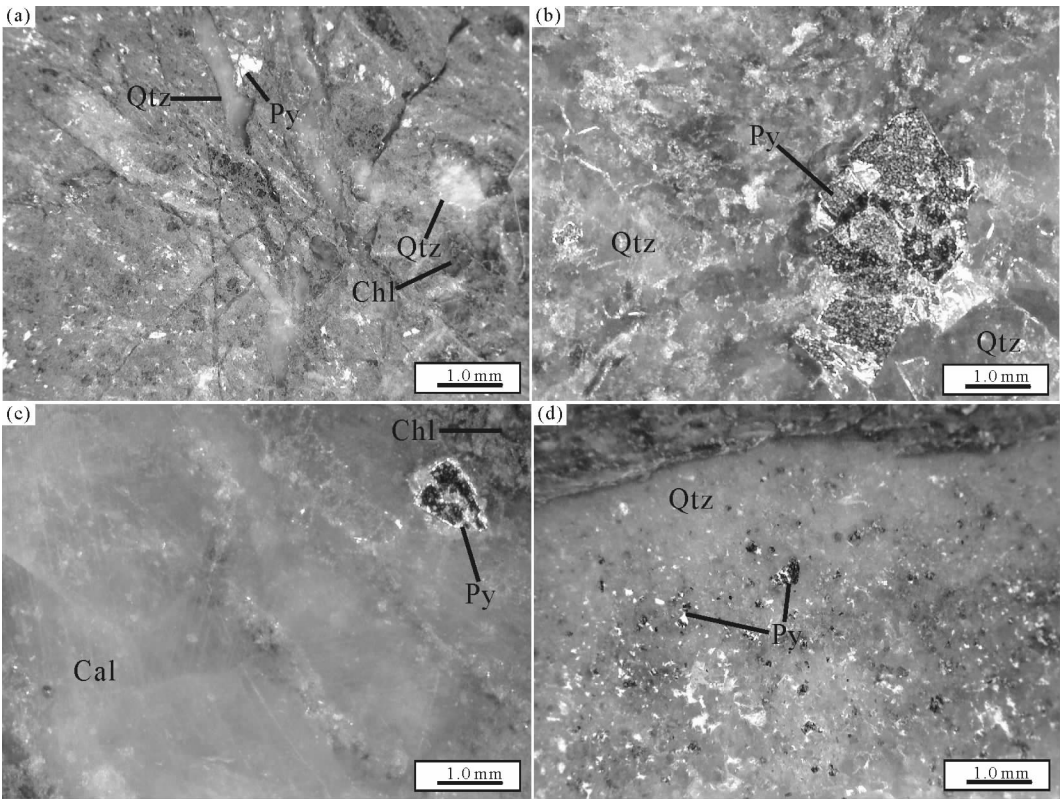
此矿化带赋存三层较大的矿体^[2,4],金品位变化为 $1.09 \times 10^{-6} \sim 38.54 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$ 。Ⅱ号矿化带为片麻岩带,走向近 EW,倾向 S,倾角陡立,约为 85° ;该矿化带有两层矿体,上层矿体脉幅较窄,下层矿体呈上部较厚而下部较薄的多边形楔子状,在此矿化带底部产出,金品位变化为 $1.92 \times 10^{-6} \sim 22.5 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$ ^[2,4]。



矿物代号:Py—黄铁矿;Qtz—石英;Chl—绿泥石;Kfs—钾长石

图 3 南小尧金矿床矿石类型

Fig. 3 Ore types in Nanxiaoyao gold deposit



(a) 矿石绿泥石化;(b) 矿石硅化,黄铁矿呈团块状分布;(c) 矿石具碳酸盐化、绿泥石化蚀变,方解石呈团块状分布;

(d) 矿石硅化,黄铁矿颗粒较小,星点状分布于石英中

矿物代号:Py—黄铁矿;Qtz—石英;Chl—绿泥石;Cal—方解石

图 4 南小尧金矿床矿石蚀变现象

Fig. 4 Ore alteration in Nanxiaoyao gold deposit

南小尧金矿床主要有绿片岩、糜棱岩和石英-硫化物脉三种矿石类型(图 3(a)-3(c))。①绿片岩矿石:为浸染状、脉状构造,矿石矿物主要为黄铁矿,自形程度较低(半自形-他形),以立方体晶形为主,具有交代残余

结构、溶蚀结构等,矿物颗粒粒径较大,主要为 210~620 μm ,在早期阶段形成的黄铁矿具有较明显的碎裂结构;局部可见呈星点状分布的黄铜矿、闪锌矿;脉石矿物主要为绿泥石,含有少量的斜长石、角闪石、绢云母及方解石等;矿石具较明显的绿泥石化,局部可见绢云母化、碳酸盐化。②糜棱岩矿石:矿石构造主要为细脉浸染状、块状构造等;矿石自形程度较低,具有交代结构、溶蚀结构等;矿石矿物主要为黄铁矿,自形程度较高(半自形-自形),以立方体晶形为主,可见五角十二面体晶形,粒径主要为 120~410 μm ,主要呈浸染状、星点状、细脉状构造形式分布,局部具有交代溶蚀的现象;脉石矿物主要为石英、绿泥石及碳酸岩等,斜长石含量较低,碳酸盐脉体较发育,有明显的菱形解理,呈细脉状、网格状构造形式分布于矿石中;矿石具较明显的硅化、碳酸盐化。③石英-硫化物脉矿石:矿石构造主要为脉状构造;矿石矿物主要为黄铁矿、方铅矿,黄铁矿矿物粒径主要为 40~270 μm ,具有较明显的溶蚀结构,方铅矿呈他形分布于石英脉中,黑三角孔特征较明显;脉石矿物主要为石英、方解石,石英结构主要为微细粒-细粒、他形,可见碳酸盐脉体以脉状或网脉状充填于矿石中;矿石硅化、碳酸盐化的现象较明显。

南小尧金矿成矿作用划分为四个成矿阶段(图 5、表 1)。①石英-黄铁矿-绿泥石阶段(I)(图 5(a)、5(b)):为早期矿化阶段,该阶段形成的矿物主要有黄铁矿、石英、绿泥石等,矿物具有一定的定向排列特征,其中黄铁矿自形程度较低,呈半自形-他形结构,主要呈浸染状及细脉状分布;②黄铁矿-绢云母-绿泥石阶段(II)(图 5(c)、5(d)):该阶段形成的矿物有黄铁矿、石英、绢云母、绿泥石等,黄铁矿自形程度较高,以半自形-自形为主,多数具较明显的溶蚀结构,主要呈浸染状和星点状分布,该阶段糜棱岩质碎裂岩黄铁矿化、绢云母化蚀变较普遍;③石英-多金属硫化物阶段(III)(图 5(e)、5(f)、5(g)):该阶段形成的矿物组合较复杂,主要矿物为石英、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等,黄铁矿自形程度较低,主要呈浸染状和细脉状分布,具较明显的溶蚀交代结构;④碳酸盐阶段(IV)(图 5(h)、5(i)):为晚期矿化阶段,方解石主要以脉状或网脉状充填于矿石中,具较明显的菱形解理。

表 1 南小尧金矿床成矿阶段及矿物生成次序表

Tab. 1 Mineralization stage and ore-forming sequence of Nanxiaoyao gold deposit

阶段 矿物	成矿阶段			
	I	II	III	IV
石英	████████████████████			████████████████████
绿泥石	████████████████████	████████████████████		
绢云母	████████████████████	████████████████████	████████████████████	
黄铁矿	████████████████████		████████████████████	████████████████████
黄铜矿			████████████████████	
闪锌矿			████████████████████	
方铅矿			████████████████████	
自然金	████████████████████	████████████████████	████████████████████	
方解石				████████████████████

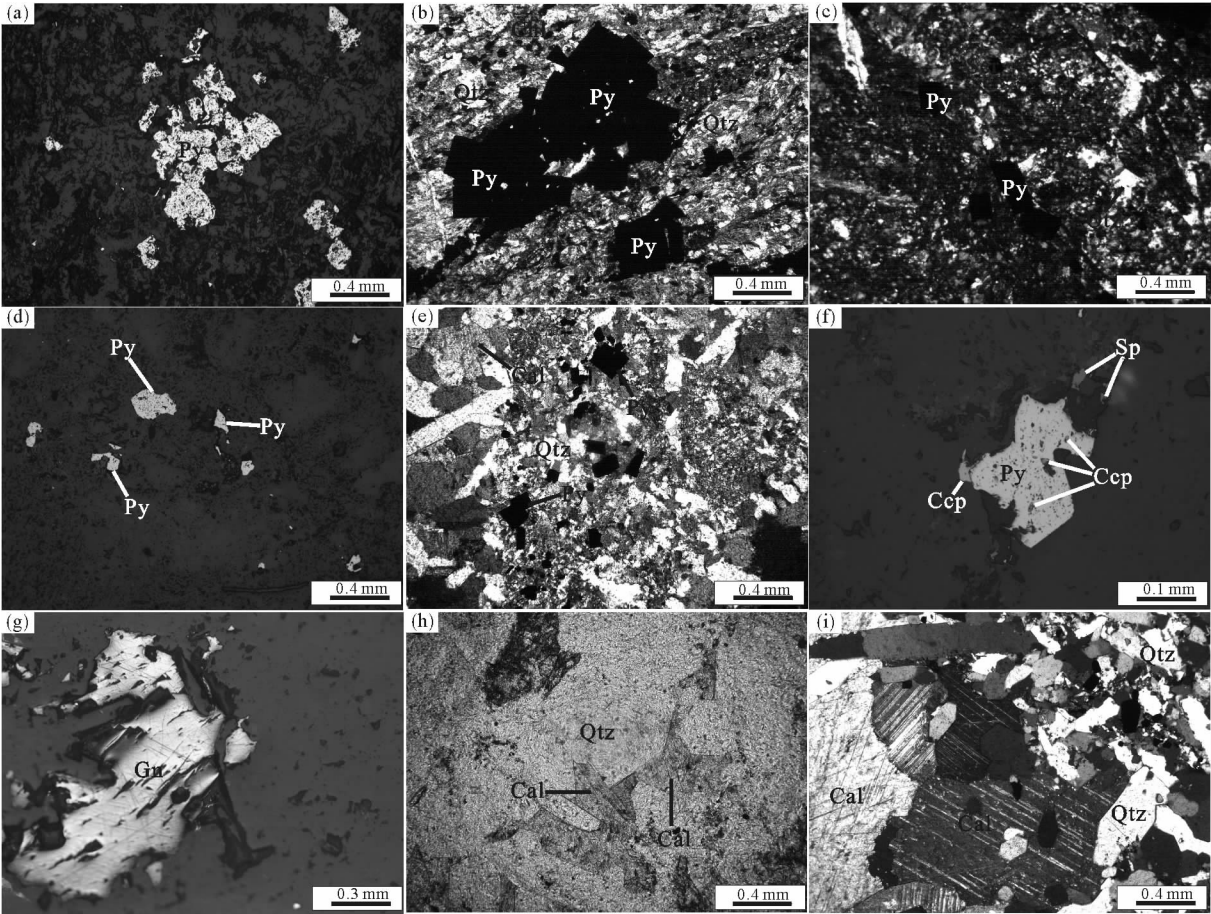
2 样品与测试方法

样品采于沂沭断裂带中段南小尧金矿的矿坑,岩性分别为黄铁矿化绿泥石化糜棱岩、黄铁绢英岩化绿片岩以及石英-硫化物脉岩,样品均较为新鲜。

硫化物原位微量元素分析在中国科学院地球化学研究所完成。仪器为 GeolasProd 激光剥蚀系统的 LA-ICP-MS,脉冲频率 10 Hz,剥蚀孔径为 33 μm ,等离子体质谱仪型号为 Agilent7700X。使用 He 作为剥蚀物质载气,采用 GSE-1G、BCR-2G、BIR-1G、Mass-1 作为标样,单点测试总时长 70 s,其中空白背景采集时间 20 s,样品剥蚀采集信号时长 30 s,停止剥蚀后继续吹气 20 s,进行系统清洗。测试时,每 8 个点测试一组

标样。详细操作流程见文献[12],分析测试结果见表 2。

硫化物原位硫同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。测试仪器为 Geolas2005 激光剥蚀系统和 Neptune Plus 等离子体质谱仪,测试时激光束斑直径 33 μm ,脉冲频率为 10 Hz,能量 50%T,电压 10.1~12.5 V,同时采用氦气为载气,氩气为补偿气体,采用标样 WS-1、WS-2 进行校正,单个测点的总时长 60 s,其中背景信号时间 20 s,激光剥蚀时间为 20 s,冲洗时间为 20 s,具体操作方法见文献[13],分析测试结果见表 3。



(a)、(b)石英-黄铁矿-绿泥石阶段(I);(c)、(d)黄铁矿-绢云母-绿泥石阶段(II);(e)、(f)、(g)石英-多金属硫化物阶段(III);(h)、(i)-碳酸盐阶段(IV);(b)、(h)为单偏光下照片;(c)、(e)、(i)为正交光下照片;(a)、(d)、(f)、(g)为反射光下照片
矿物代号:Py—黄铁矿;Ccp—黄铜矿;Sp—闪锌矿;Gn—方铅矿;Cal—方解石;Chl—绿泥石;Ser—绢云母;Qtz—石英

图 5 南小尧金矿床各矿化阶段显微照片

Fig. 5 Microphotographic of different mineralization stages of Nanxiaoyao gold deposit

3 元素地球化学特征

3.1 硫化物微量元素特征

研究区金矿床黄铁矿微量元素含量如表 2 所示,黄铁矿中 Co 含量 $0.53 \times 10^{-6} \sim 4161.88 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$,均值 $299.17 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$;Ni 含量 $2.51 \times 10^{-6} \sim 813.67 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$,均值 $141.02 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$;Co/Ni 比值 $0.04 \sim 51.08$,均值 3.24;亲铁元素 As、Te 含量分别为 $0.25 \times 10^{-6} \sim 114.18 \times 10^{-6}$ 、 $0.17 \times 10^{-6} \sim 4.76 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$;亲硫元素 Se、Bi 等含量分别为 $0.42 \times 10^{-6} \sim 21.16 \times 10^{-6}$ 、 $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.49 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$;成矿元素中 Cu、Pb、Zn 含量分别为 $0.17 \times 10^{-6} \sim 472.22 \times 10^{-6}$ 、 $0.14 \times 10^{-6} \sim 1486.94 \times 10^{-6}$ 、 $0.40 \times 10^{-6} \sim$

表 2 南小尧金矿床黄铁矿微量元素含量及特征值
Tab. 2 Trace element abundances and features of pyrite from Nanxiaoyao gold deposit

测试 点位	Fe	S	Cu	Zn	Pb	Te	Se	Mo	Sn	Sb	Bi	As	Co	Ni	Au	Ag	S/Fe (atomic ratio)	Fe/ (S+ As)	Co/Ni	Se/Te	As/Sb	Au/Ag
A001	44.83	54.54	4.14	3.53	15.07	1.11	16.82	0.10	0.08	0.21	0.35	114.18	4 161.88	81.47	0.021	1.261	2.12	0.82	51.08	15.15	543.71	0.016 5
A002	45.24	54.42	3.83	3.26	20.28	0.67	1.64	0.01	0.37	0.39	0.07	2.23	14.33	10.70	0.035	0.549	2.10	0.83	1.33	2.45	5.72	0.063 2
A003	37.74	46.32	23.59	32.46	58.84	0.57	3.30	0.54	8.32	0.98	0.23	5.04	101.59	53.67	0.154	2.371	2.14	0.81	1.89	5.79	5.14	0.065 0
A004	44.39	55.5	120.04	10.84	1.08	0.57	21.16	—	0.03	0.04	0.18	15.69	586.08	160.80	0.015	0.200	2.18	0.79	3.64	37.12	392.25	0.076 6
A005	43.18	56.15	3.07	7.15	15.72	0.85	0.80	—	—	0.15	0.02	1.35	3.78	10.22	—	0.140	2.27	0.76	0.36	0.94	9.00	—
A006	43.71	45.26	18.42	11.36	38.47	1.24	3.70	0.47	2.46	0.61	0.11	4.55	474.30	250.07	0.034	3.245	1.81	0.96	1.89	2.98	7.46	0.010 3
A007	44.12	55.84	0.17	2.51	0.14	1.20	1.74	—	—	—	—	0.25	9.30	231.65	—	0.008	2.21	0.79	0.04	1.45	—	—
A008	47.04	52.56	2.72	1.01	8.68	0.28	1.55	—	0.07	0.13	—	—	8.43	89.13	0.018	0.682	1.95	0.89	0.09	5.54	—	0.026 6
A009	45.69	54.30	0.78	2.19	4.90	0.17	2.43	0.01	—	0.37	0.01	0.39	0.65	8.95	—	0.070	2.07	0.84	0.07	14.29	1.05	—
A010	46.24	53.35	2.68	5.31	1 426.66	2.17	2.85	0.04	0.12	0.37	0.02	1.69	105.61	70.56	0.044	0.181	2.01	0.86	1.49	1.31	4.57	0.241 6
A011	45.05	53.80	3.35	0.82	8.38	1.29	1.88	—	0.01	0.14	0.09	0.67	0.53	2.51	0.015	0.203	2.08	0.83	0.21	1.46	4.79	0.072 2
A012	44.73	55.08	2.83	0.6	1 296.67	1.50	3.83	—	0.10	0.18	0.07	—	106.42	251.77	0.094	1.118	2.15	0.81	0.42	2.55	—	0.084 2
A013	43.74	56.17	2.27	1.27	11.02	3.07	6.28	0.01	0.05	0.24	0.02	2.20	95.48	405.54	0.024	0.595	2.24	0.77	0.23	2.05	9.17	0.040 8
A014	44.84	53.90	10.89	5.42	26.31	0.53	0.46	0.06	—	0.45	0.03	1.61	11.13	58.72	0.004	0.440	2.10	0.83	0.18	0.87	3.58	0.008 9
A015	43.88	55.96	0.33	0.53	1.81	1.54	5.05	0.03	0.17	—	0.01	0.93	219.13	813.67	0.002	0.021	2.23	0.78	0.26	3.28	—	0.089 5
A016	43.71	54.25	472.22	28.70	137.53	1.21	1.57	0.05	1.31	2.2	0.05	4.58	12.38	92.63	0.007	5.637	2.17	0.80	0.13	1.30	2.08	0.001 2
A017	43.14	56.77	0.98	0.43	4.82	—	0.42	0.01	0.06	—	0.01	0.40	5.61	34.58	—	0.057	2.30	0.75	0.16	—	—	—
A018	44.9	54.31	2.81	0.40	12.20	1.26	0.49	0.01	0.31	0.12	0.01	1.04	24.36	88.63	0.006	0.138	2.11	0.82	0.27	0.39	8.67	0.043 3
A019	45.25	54.56	46.50	1.48	1486.94	4.76	2.61	—	0.04	2.72	0.49	5.58	28.22	41.76	0.127	40.292	2.11	0.82	0.67	0.55	2.05	0.003 1
A020	43.82	55.72	3.21	1.23	185.40	0.93	0.68	—	0.19	0.20	0.01	1.00	14.15	63.27	0.008	0.550	2.22	0.78	0.22	0.73	5.00	0.014 9

注:表中Fe、S的单位为%,其余微量元素含量单位为10⁻⁶ μg/g;“—”表示低于检测限。测试单位:中国科学院地球化学研究所

$32.46 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$; 贵金属元素 Ag、Au 含量分别为 $0.008 \times 10^{-6} \sim 40.292 \times 10^{-6}$ 、 $0.002 \times 10^{-6} \sim 0.154 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$ 。成矿流体中金元素的迁移、富集、沉淀与 Ag、As、Te 元素关系密切,南小尧金矿床黄铁矿中 Au 与 Ag、As、Te 相关关系显示,Au 元素与 As 有较强的正相关性(图 6),表明 As 在南小尧金矿床形成过程中对金的搬运与富集具有重要作用^[14-15],Au 与 Ag 也显示正相关性,反映 Au、Ag 共同成矿具有相似的迁移富集机制,黄铁矿中 Au 元素与 Ag、As 具有正相关性,表明金矿床中 Au 元素的迁移、富集与 Ag、As 关系较密切。

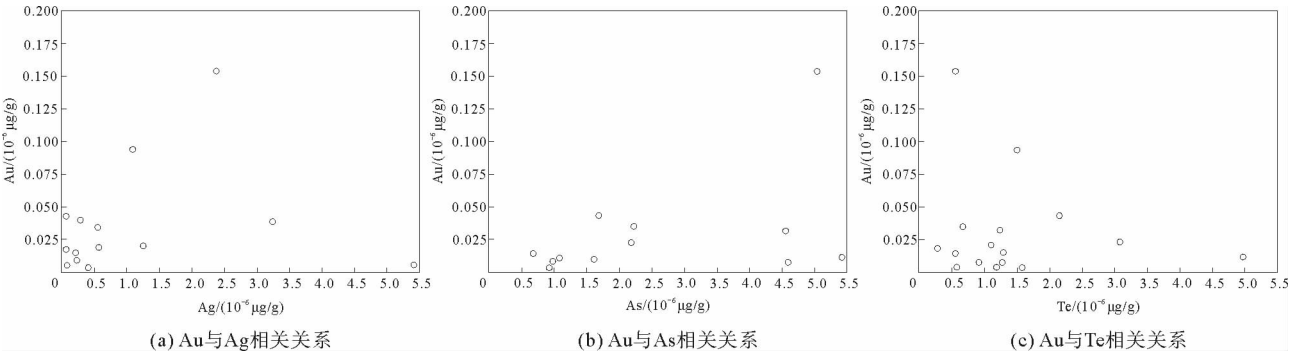


图 6 南小尧金矿床黄铁矿 Au-Ag、Au-As、Au-Te 含量及相关性

Fig. 6 The absolute contents and correlation between Au and Ag, Au and As, Au and Te of pyrites in Nanxiaoyao gold deposit

理论上,黄铁矿主量元素 S/Fe 的原子比应为 2,S、Fe 含量应分别为 53.45%、46.55%。而南小尧金矿床黄铁矿测点的 S/Fe 原子比绝大多数大于 2(表 2),由 n_s 与 n_{Fe} 实际原子个数比图解(图 7),可知 n_s/n_{Fe} 为 2.01~2.27。以上分析显示黄铁矿中铁亏损较明显,硫元素较铁元素富,表明南小尧金矿床中黄铁矿可能发生于类质同象替代^[4,16]。相关研究表明,黄铁矿的形成深度与其主成分含量及 $Fe/(S+As)$ 值相关性较高^[4,16]:内生热液矿床形成深度深,黄铁矿具有富硫贫铁的特征;形成深度浅,则黄铁矿表现为富铁贫硫的特征^[17-18]。黄铁矿 $Fe/(S+As)$ 值主要为 0.81~0.89, n_s/n_{Fe} 为 1.81~2.27。以上分析表明,矿床中黄铁矿具有富硫及铁亏损较明显的特征,说明南小尧金矿床可能形成于中深部环境。

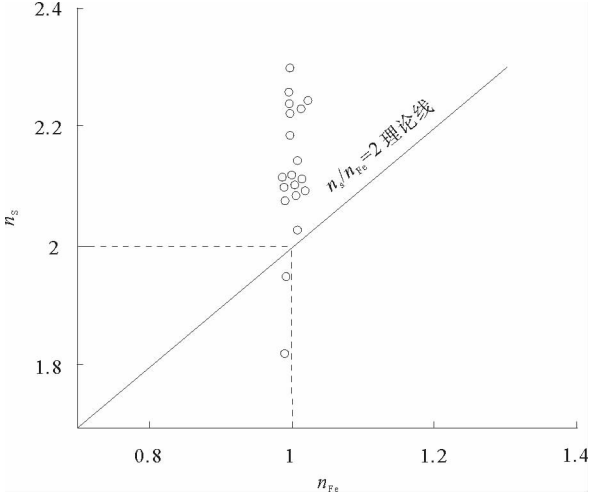


图 7 n_s 与 n_{Fe} 实际原子个数比图解

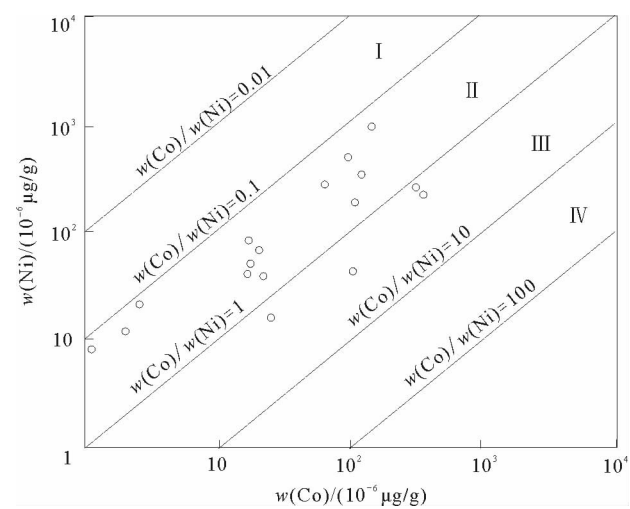
Fig. 7 n_s and n_{Fe} actual atomic number ratio diagram

黄铁矿 Au/Ag 比值可以反映成矿温度的高低,Au 元素主要在较高温度和较深部的矿床中富集(Au/Ag 比值高),Ag 元素则多在中深部或地表的中低温矿床中富集(Au/Ag 比值低)^[13]。分析结果显示,南小尧金矿床黄铁矿 Au/Ag 值较低,为 0.001 2~0.241 6,据此推测金矿床可能形成于中深部的中低温环境。黄铁矿中 As 含量对矿床形成温度有一定的指示作用^[18],黄铁矿 As 含量为 $0.25 \times 10^{-6} \sim 114.18 \times 10^{-6}$,也表明金矿床可能形成于中低温环境。

黄铁矿中 Te、Se/Te 对黄铁矿中杂质含量及结晶速度具有指示作用^[19-20]。南小尧金矿床黄铁矿中 Se/Te 值较低,主要为 0.39~3.28,Te 含量为 $0.17 \times 10^{-6} \sim 4.76 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$,表明南小尧金矿床黄铁矿杂质含量较高,结晶速度较快。研究显示成矿液体中的 f_{O_2} 较低时,不利于黄铁矿中 Sb 元素的富集(As/Sb 比值

较高)^[19-20],成矿流体系统具有较强的还原性,南小尧金矿床黄铁矿中 Sb 含量较低,为 $0.12 \times 10^{-6} \sim 0.98 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$,As/Sb 值较高,为 $1.05 \sim 9.17$,反映成矿流体系统中 f_{O_2} 较低,成矿流体具有一定的还原性。

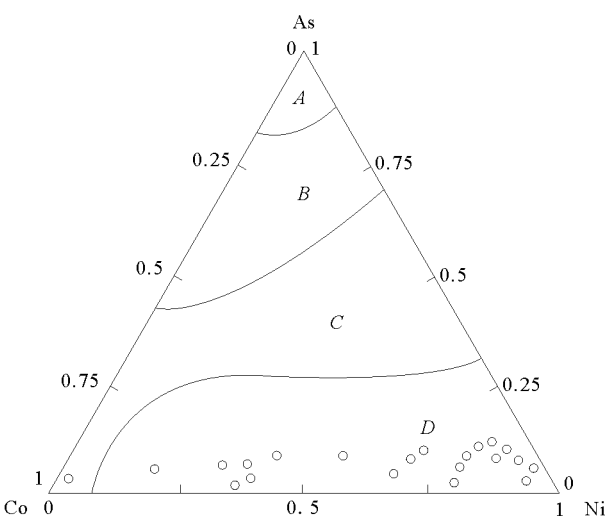
亲铁元素 Co、Ni 等常可以类质同象形式替代黄铁矿中的 Fe、As 常替代 S 进入到黄铁矿的晶格中,研究显示,黄铁矿 Co/Ni 比值对成矿条件具有一定的指示意义^[8,16,18]。南小尧金矿床黄铁矿的 Co 和 Ni 含量及 Co/Ni、S/Fe 比值见表 2,黄铁矿 Co/Ni 值为 $0.13 \sim 3.64$,大多数分布在岩浆与沉积改造成因黄铁矿范围内,在黄铁矿 Co-Ni 图解上(图 8),数据点多位于岩浆区和沉积改造区,表明金矿床的形成与岩浆活动关系密切,在后期可能经历了结晶后热液改造。在 As-Co-Ni 图解中(图 9),数据点主要落在火山与次火山热液型区域,表现出贫 As 的热液特征,表明南小尧金矿的形成与火山活动具有一定的成因联系。因此,认为研究区金矿床在形成过程中,来自于深部的成矿热液以及火山、次火山热液活动携带着 Au 上涌到断裂中,并可能对太古代泰山群进行了热液改造,萃取了“矿源层”(泰山岩群)的 Au 元素。



I—沉积区; II—沉积改造区; III—岩浆区; IV—热液区

图 8 南小尧金矿床黄铁矿 Ni-Co 图解^[21]

Fig. 8 Ni-Co diagram of pyrite from Nanyangyao gold deposit



A—地下卤水淋滤型; B—岩浆热液型; C—变质热液型; D—火山与次火山热液型

图 9 南小尧金矿床黄铁矿 As-Co-Ni 图解^[22]

Fig. 9 As-Co-Ni diagram of pyrite from Nanyangyao gold deposit

3.2 硫化物硫同位素特征

硫同位素作为成矿物质来源及成矿环境的指示剂,在矿床成因研究中应用广泛^[23]。以南小尧金矿床硫化物中硫同位素示踪成矿物质来源,为研究矿床成因提供依据。南小尧金矿硫化物硫同位素测试结果见表 3,绿片岩矿石中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-0.9\text{‰} \sim 2.1\text{‰}$;石英-硫化物脉岩矿石中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $1.3\text{‰} \sim 2.9\text{‰}$;而糜棱岩矿石中硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值较低,方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 呈负值为 $-3.2\text{‰} \sim -1.3\text{‰}$,可能是受到地表水的作用使含矿体系中 $\delta^{34}\text{S}$ 值降低。南小尧金矿床不同矿石中硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值存在差异,指示不同矿石中成矿流体的物理化学条件可能存在差异。

南小尧金矿床黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-0.9\text{‰} \sim 2.9\text{‰}$,平均 1.54‰ ,极差为 3.8‰ ;方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值 $-3.2\text{‰} \sim -1.3\text{‰}$,平均 -2.0‰ ,极差为 1.9‰ 。硫化物的硫同位素组成分布图(图 10)显示,硫同位素属幔源硫特征;方铅矿、黄铁矿硫化物硫同位素分布直方图(图 11)显示,硫同位素分布范围较集中、变异小,具有较好的塔式分布效应,硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值主要集中在 $-2.0\text{‰} \sim 3.0\text{‰}$,研究认为幔源或者源于深部与岩浆作用有关的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 约为 0‰ ^[9,18,24-25],其变化范围较小,因此认为南小尧金矿床成矿物质可能来源于深部。

表 3 南小尧金矿床硫化物硫同位素值
Tab. 3 The $\delta^{34}\text{S}$ values of sulfide from Nanxiaoyao gold deposit

序号	点位编号	测试矿物	岩性	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
1	S001	黄铁矿(Py)	黄铁绢英岩化绿片岩	-0.2
2	S002	黄铁矿(Py)	黄铁绢英岩化绿片岩	2.1
3	S003	黄铁矿(Py)	黄铁绢英岩化绿片岩	1.8
4	S004	黄铁矿(Py)	黄铁绢英岩化绿片岩	-0.9
5	S005	黄铁矿(Py)	黄铁绢英岩化绿片岩	1.7
6	S006	黄铁矿(Py)	黄铁绢英岩化绿片岩	1.7
7	S007	黄铁矿(Py)	黄铁矿化绿泥石化糜棱岩	0.5
8	S008	黄铁矿(Py)	黄铁矿化绿泥石化糜棱岩	0.4
9	S009	黄铁矿(Py)	黄铁矿化绿泥石化糜棱岩	1.0
10	S010	方铅矿(Gn)	黄铁矿化绿泥石化糜棱岩	-1.3
11	S011	方铅矿(Gn)	黄铁矿化绿泥石化糜棱岩	-3.2
12	S012	方铅矿(Gn)	黄铁矿化绿泥石化糜棱岩	-1.8
13	S013	方铅矿(Gn)	黄铁矿化绿泥石化糜棱岩	-1.7
14	S014	黄铁矿(Py)	石英-硫化物脉	2.9
15	S015	黄铁矿(Py)	石英-硫化物脉	2.9
16	S016	黄铁矿(Py)	石英-硫化物脉	2.8
17	S017	黄铁矿(Py)	石英-硫化物脉	2.6
18	S018	黄铁矿(Py)	石英-硫化物脉	2.0
19	S019	黄铁矿(Py)	石英-硫化物脉	1.8
20	S020	黄铁矿(Py)	石英-硫化物脉	1.6
21	S021	黄铁矿(Py)	石英-硫化物脉	1.9
22	S022	黄铁矿(Py)	石英-硫化物脉	1.4
23	S023	黄铁矿(Py)	石英-硫化物脉	1.3

测试单位:中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室。

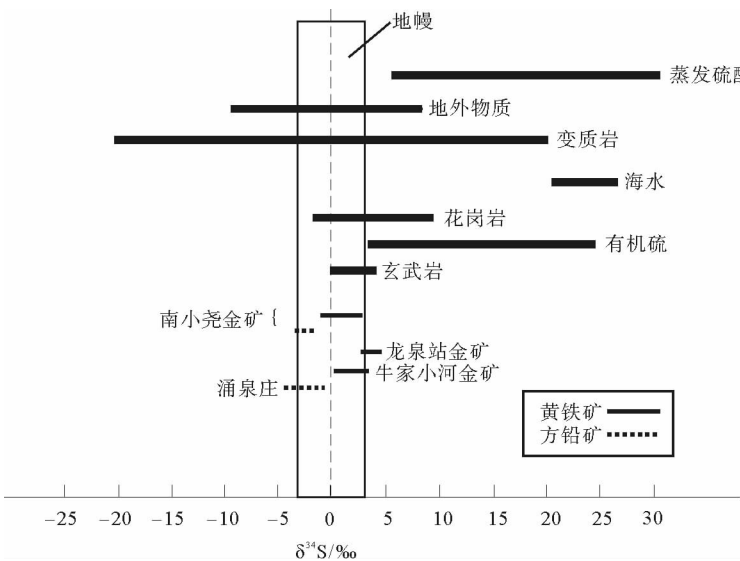


图 10 硫化物硫同位素组成分布图(有修改)^[24]
Fig. 10 Distribution of S isotopes in the sulfide

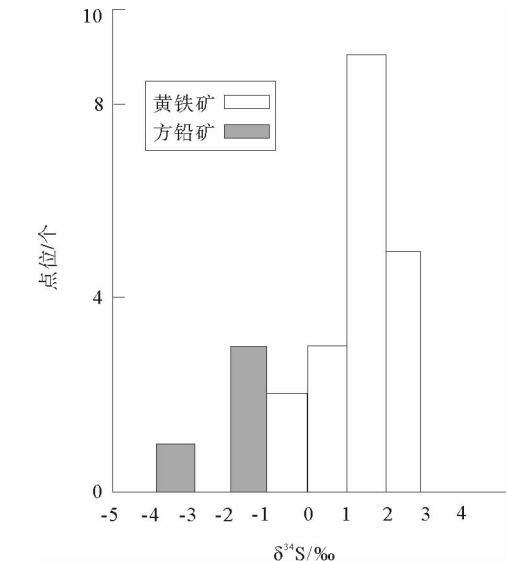


图 11 南小尧金矿床硫化物硫同位素分布直方图
Fig. 11 Histogram of S isotopes distribution
in the sulfide from Nanxiaoyao gold deposit

4 矿床成因探讨

4.1 成矿物质来源

沂沭断裂带是区域性切慢断裂,可作为岩石圈不同深度岩浆和流体向上迁移的通道,中生代岩浆作用和成矿作用复杂^[1,26-27]。研究^[1,4]认为,沂沭断裂带中段太古代泰山岩群和燕山期岩浆岩都具有较高的金含量,可能为沂沭断裂带中段金矿的矿源层。沂沭断裂带中段变质基底岩系也具有较高的 Au 丰度,成矿物质来源可能与古元古代的变质基底岩系有关,而变质基底的原岩可能为基性-中性火山沉积建造^[1,4]。李洪奎等^[1]研究沂沭断裂带中段金矿硫化物的硫同位素均显示幔源硫特征(图 10),铅同位素特征显示铅主要由地壳深部供给。研究认为来源于地幔或深部与岩浆作用有关的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 约为 0‰^[9,18,24-25],其变化范围较小,研究区金矿床硫化物的硫同位素特征显示幔源硫的特征, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-3.2\text{‰} \sim 2.9\text{‰}$,结合前人研究成果^[1,4],推测金矿床成矿物质可能来源于深部,成矿物质可能与火山-岩浆作用导致的地幔物质上涌有关,由燕山期岩浆热液流体携带着 Au 等成矿物质向上运移。因此认为南小尧金矿床成矿物质可能来源于地幔,燕山期岩浆活动对金矿床的形成具有重要的作用。

4.2 成矿流体特征

硫同位素示踪可以反映成矿流体的来源^[18,25,28-29],硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值显示不同矿石中成矿流体的物理化学条件可能存在差异;金矿床矿石中未见硫酸盐矿物,硫化物中的 $\delta^{34}\text{S}$ 特征可以表示成矿流体中总硫 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma}$ 的特征。金矿床黄铁矿微量元素分析结果显示,黄铁矿中 $n_{\text{S}}/n_{\text{Fe}}$ 主要为 $2.01 \sim 2.27$, $\text{Fe}/(\text{S}+\text{As})$ 值主要为 $0.81 \sim 0.89$,分析显示黄铁矿具有富硫、铁亏损明显的特征,表明金矿床可能形成于中深部环境。南小尧金矿床黄铁矿 Au/Ag 值较低,为 $0.0012 \sim 0.2416$,As 含量为 $0.25 \times 10^{-6} \sim 114.18 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$,表明金矿床可能形成于中深部的中低温环境。黄铁矿 Te 含量为 $0.17 \times 10^{-6} \sim 4.76 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$,Se/Te 值较低,主要为 $0.39 \sim 3.28$,指示黄铁矿结晶速度较快,杂质含量较高。黄铁矿 Sb 含量较低,主要为 $0.12 \times 10^{-6} \sim 0.98 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$,As/Sb 值较高,主要为 $1.05 \sim 9.17$,反映流体系统氧逸度较低,成矿流体具有一定的还原性。黄铁矿 Co 含量、Au/Ag 比值等微量元素特征显示研究区金矿床成矿热液为中低温流体。黄铁矿 Co-Ni 图解显示金矿床的形成与岩浆活动关系密切,在后期可能经历了结晶后热液改造。黄铁矿 As-Co-Ni 图解显示金矿成矿热液类型主要为火山与次火山热液型,表明金矿床的形成与火山活动具有一定的成因联系,可能与燕山期的火山和次火山活动有关^[1,4,27]。

4.3 矿床成因探讨

在矿床地质研究基础上,结合地球化学分析结果,认为沂沭断裂带中段南小尧金矿床成因机制可能如下:受库拉板块和太平洋板块运动的影响^[1],沂沭断裂带由韧性构造体制转化为脆性断裂,扩大了容矿空间^[1,4-5],燕山期岩浆-火山活动剧烈,来自于深部的成矿热液以及火山、次火山热液活动携带着 Au 上涌到断裂中,并对太古代泰山岩群进行热液改造,萃取了“矿源层”(泰山岩群)的 Au 元素,所蕴含的热量也为金矿化作用提供了足够的热源,同时,少量大气降水沿断裂带下渗与来源于深部的流体混合,加速了 Au 的沉淀,使 Au 在中深部的适宜成矿条件下富集成矿。

5 结论

1) 南小尧金矿床可划分为四个成矿阶段,分别为:石英-黄铁矿-绿泥石阶段、黄铁矿-绢云母-绿泥石阶段、石英-多金属硫化物阶段和碳酸盐阶段。

2) 黄铁矿硫同位素显示硫的深源特征,表明金矿床的成矿物质来源于深部;硫化物微量元素特征显示金矿床形成于中深部的中低温成矿环境,成矿作用与燕山期的火山-次火山活动关系密切。

3) 南小尧金矿床成矿模式可概括为:中生代融熔的岩浆以及火山与次火山热液沿沂沭断裂带上涌,为金矿的形成带来了大量的成矿物质和成矿流体,在中深部的成矿环境中随成矿条件的改变而使 Au 在适宜的构造位置富集并沉淀成矿。

参考文献:

- [1]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: 3-170.
- [2]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 Hongkui, YANG Yongbo, WANG Yuelin. Isotopic geochronological characteristics and implications of the Nanxiaoyao gold deposit in Yishui[J]. Geological Survey and Research, 2009, 32(1): 1-7.
- [3]梁平, 祝培刚, 祝德成, 等. 胶西北大尹格庄斑状花岗岩地球化学特征及地质意义[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 22-34.
LIANG Ping, ZHU Peigang, ZHU Decheng, et al. Geochemical characteristics and geological significance of porphyritic granite in Dayingezhuang, northwestern Jiaodong[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(4): 22-34.
- [4]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 Xiaotong, MAO Guangzhou, WANG Xiangjun, 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.
- [5]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: 8-46.
- [6]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(1): 937-938.
HE Ling, YANG Bin, CHEN Yan, et al. The geochemical characteristic and analysis of mineralization of Longquanzhan gold deposit[J]. Ore Deposit, 2010, 29(1): 937-938.
- [7]孔令芝, 刘其臣. 山东沂南牛家小河金矿矿床特征及找矿前景[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 232-235.
- [8]毛光周, 华仁民, 高剑峰, 等. 江西金山金矿床含金黄铁矿的稀土元素和微量元素特征[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 412-426.
MAO Guangzhou, HUA Renmin, GAO Jianfeng, et al. REE composition and trace element features of gold-bearing pyrite in Jinshan gold deposit, Jiangxi Province[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(4): 412-426.
- [9]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 Guangzhou, WANG Xiangjun, DENG Binghong, 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.
- [10]MAO G Z, HUA R M, LONG G M, et al. Rb-Sr dating of pyrite and quartz fluid inclusions and origin of ore-forming materials of the Jinshan gold deposit, Northeast Jiangxi Province, South China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2013, 87(6): 1658-1667.
- [11]CAO M P, YAO J M, DENG X H, et al. Diverse and multistage Mo, Au, Ag-Pb-Zn and Cu deposits in the Xiong'er Terrane, East Qinling: From Triassic Cu mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 81(2): 565-574.
- [12]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(1): 746-759.
- [13]LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al. In situ major and trace elements of anhydrous analysis minerals LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257(1): 34-43.
- [14]BRISTOL P K, SPRY P G, VOUDOURIS P C, et al. Geochemical and geochronological constraints on the formation of shear-zone hosted Cu-Au-Bi-Te mineralization in the Stanos area, Chalkidiki, Northern Greece[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 66(1): 266-282.
- [15]杨荣生, 陈衍景, 谢景林. 甘肃阳山金矿床含砷黄铁矿及毒砂的 XPS 研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2791-2800.
YANG Rongsheng, CHEN Yanjing, XIE Jinglin. X-ray photoelectron spectroscopic study on arsenian pyrite and arsenopyrite from the Yangshan gold deposit, Gansu Province (North China)[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(11): 2791-2800.
- [16]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 Jinlong, 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.
- [17]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, 2004, 24(4): 6-13.

- ZHOU Xuewu, LI Shengrong, LU Li, 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, 2004, 24(4): 6-13.
- [18] 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 Suqiao, JIA Jinsheng, ZHONG Zengqiu, 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.
- [19] 李晶, 陈衍景, 李强之, 等. 东秦岭上官金矿流体成矿作用: 矿物学研究[J]. 矿物岩石, 2004, 24(3): 28-35.
- LI Jing, CHEN Yanjing, LI Qiangzhi, et al. Hydrothermal metallogeny of the Shangong gold deposit, East Qinling evidence from mineralogical study[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2004, 24(3): 28-35.
- [20] 李晶, 陈衍景, 刘迎新. 华北克拉通若干脉状金矿的黄铁矿标型特征与流体成矿过程[J]. 矿物岩石, 2004, 24(3): 93-102.
- LI Jing, CHEN Yanjing, LIU Yingxin. Typomorphic characteristics of pyrite from the Lode gold deposits in North China Craton: Implications for fluid mineralization[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2004, 24(3): 93-102.
- [21] BAJWAH Z U, SECCOMBE P K, OFFLER R. Trace element distribution Co; Ni ratios and genesis of the big Cadi iron-copper deposit, New South Wales, Australia[J]. Mineralium Deposita, 1987, 22(4): 292-303.
- [22] 李红兵, 曾凡治. 金矿中的黄铁矿标型特征[J]. 地质找矿论丛, 2005, 20(3): 199-203.
- LI Hongbing, ZENG Fanzhi. The pyrite's typomorphic characteristics in gold deposit[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2005, 20(3): 199-203.
- [23] 张瑞忠, 王中亮, 王德瑞, 等. 胶西北大尹格金矿床成矿机理: 载金黄铁矿标型及硫同位素地球化学约束[J]. 岩石学报, 2016, 32(8): 2451-2464.
- ZHANG Ruizhong, WANG Zhongliang, WANG Sirui, et al. Metallogenic mechanism of Dayingezhuang gold deposit, north-western Jiaodong Peninsula: Geochemistry constrains from the gold bearing pyrite typomorph and sulfur isotope[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(8): 2451-2464.
- [24] 郑永飞. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 15-25.
- [25] OHMOTO H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Economic Geology, 1972, 67(5): 551-578.
- [26] 陈衍景, PIRAJNO Franco, 赖勇, 等. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境[J]. 岩石学报, 2004, 20(4): 907-922.
- CHEN Yanjing, PIRAJNO Franco, LAI Yong, et al. Metallogenic time and tectonic setting of the Jiaodong gold province, Eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(4): 907-922.
- [27] 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题[J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2696-2726.
- CHEN Yanjing, ZHAI Mingguo, JIANG Shaoyong, et al. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(11): 2696-2726.
- [28] 陈光远, 孙岱生, 张立, 等. 黄铁矿成因形态学[J]. 现代地质, 1987, 1(1): 60-76.
- CHEN Guangyuan, SUN Daisheng, ZHANG Li, et al. Morphogenesis of pyrite[J]. Geoscience, 1987, 1(1): 60-76.
- [29] ZHANG J, LI L, GILBERT S, et al. LA-ICP-MS and EPMA studies on the Fe-As-S minerals from the Jinlongshan gold deposit, Qinling orogen, China: Implications for ore-forming processes[J]. Geological Journal, 2014, 49(4): 482-500.

(责任编辑: 高丽华)