

土岭-石湖金矿床中黄铁矿的成分特征 及其成因意义

崔艳合

(中国地质科学院矿床地质研究所, 北京 100037)

主题词 黄铁矿 微量元素

提 要 河北省灵寿县土岭-石湖金矿床产于燕山期花岗闪长岩体与太古宙阜平群变质岩系的外接触带中。金矿床中黄铁矿的硫同位素显示金的成矿热液与花岗闪长岩岩浆同源。黄铁矿的主成分具有亏硫特征, 属典型的内生型。从矿脉到蚀变岩及受蚀变围岩, 黄铁矿的Au、Ag、As含量及Au/Ag比值降低, Co、Ni、Se含量及Co/Ni比值、S/Se比值升高。这些元素的含量及有关参数对金及黄铁矿的取样位置具有良好的指示意义, 是确定矿体位置及其含金性的标志, 也是成矿温度的函数。

1 矿区地质特征

土岭-石湖金矿区位于河北省灵寿县北部, 其大地构造位置属华北地台山西台背斜太行隆起带之东缘, 阜平隆起的南部。矿区内出露有太古宙阜平群角闪斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩, 夹少量浅粒岩、大理岩、斜长角闪岩和角闪磁铁石英岩。主要矿体产于团泊口组黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩及斜长角闪岩等变质地层中, 受近南北向延展的断裂构造控制。

矿区内热液脉体比较发育: 有沿岩体节理展布的黄铁矿细脉; 有沿团泊口组中裂隙分布的石英脉、黄铁矿(多金属硫化物)石英脉、碳酸盐脉等。其中, 黄铁矿(多金属硫化物)石英脉即含金矿脉。根据矿脉间相互关系, 热液成矿作用主要分为四个阶段: I、白色粗晶石英脉; II、黄铁矿石英脉; III、黄铁矿多金属硫化物石英脉; IV、碳酸盐脉。II、III阶段为矿区的主成矿阶段。金以自然金、银金矿等独立矿物形式赋存于黄铁矿(多金属硫化物)石英脉中, 与石英、黄铁矿共生, 少部分与方铅矿、闪锌矿共生。自然金(银金矿)的形态以不规则球粒、串珠、长条、叶片及柱状为主, 亦可见八面体自形晶。据电子探针分析结果, 自然金(银金矿)的成色为650—750; 含Bi较高, 一般大于1.173%, 最高达1.441%; Hg的含量也比较高(0.557%—1.891%)。

矿脉围岩蚀变发育, 有黄铁矿化、硅化、绢云母化、绿泥石化及叶蜡石化。黄铁矿化与金矿化关系密切。黄铁绢英岩是该地区金矿的直接找矿标志。

本矿区黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 1.7‰ 至 5.0‰ 之间, 极差为 3.3‰ (表 1)。92% 的样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 1.7‰ 至 2.8‰ 之间, 极差为 1.1‰, 略微正向偏离陨硫石。通常认为, 与重熔岩浆有关的硫同位素组成以极值不大的正向偏离陨硫石为特征。因此, 推断土岭-石湖金矿区黄铁矿乃至成矿热液中的硫来自深熔花岗质岩浆。而且在热液成矿过程中, 围岩对流体中硫的混染程度低。

表 1 土-石矿区黄铁矿的硫同位素组成

Table 1 Sulfur isotope composition of pyrite from the Tuling-Shihu gold district

样号	产状	$\delta^3\text{S}$ (‰)	资料来源
Szk13-3	黄铁绢英岩	1.7	本文
S _Y Dd ₁	黄铁矿多金属硫化物石英脉	2.4	
S _Y D2-3	黄铁矿绿泥石岩	2.0	
Td1-4	黄铁矿石英脉	2.1	
Gd1-11	黄铁矿石英脉	1.9	
Szk50-7	多金属硫化物石英脉	1.7	〔2〕
B116-1-F	含硫化物石英脉	2.5	
YD1-P	多金属硫化物石英脉	2.8	
S _Y D3Q-3-P	含硫化物石英脉	2.2	
T _Y D22-1	含硫化物石英脉	2.4	
Szk33-3-1	黄铁矿多金属硫化物石英脉	2.5	
Szk49	黄铁矿石英脉	5.0	
S _Y D2Q-4	黄铁矿绿泥石岩	2.1	

测试者: 吉林冶金地质勘探公司同位素室, 1987年。

2 黄铁矿的主要成分

黄铁矿的理论成分为 Fe 46.55%, S 53.45%。在已有资料中, 沉积成因的黄铁矿中 Fe、S 组成与理想成分相近或含硫略多一些 (如: Fe 46.16%, S 53.84%), 黄铁矿型 Cu 矿床、多金属矿床、斑岩型铜矿床以及与超基性岩有关的 Cu-Ni 矿床中的黄铁矿均具亏硫特征, 与火山作用有关的高岭土矿床中的黄铁矿则近于理想值。从总体上看, 外生黄铁矿相对富硫, 而内生黄铁矿相对亏硫。

土岭-石湖金矿区黄铁矿的 Fe、S 含量均低于黄铁矿的理论成分 (表 2), 因为该黄铁矿中含有其它矿物的微细包裹体及类质同象元素。从扣除杂质后计算的黄铁矿化学式看, 它们具有贫硫的特点, 是典型的内生黄铁矿。矿脉中黄铁矿的化学式为: $\text{Fe}_{0.9922}\text{S}_2$ — $\text{Fe}_{1.0781}\text{S}_2$, 平均化学式为: $\text{Fe}_{1.0363}\text{S}_2$; 蚀变岩中黄铁矿的化学式变化于 $\text{Fe}_{0.9862}\text{S}_2$ — $\text{Fe}_{1.0716}\text{S}_2$ 之间, 平均为 $\text{Fe}_{1.0286}\text{S}_2$ 。显然, 矿脉中黄铁矿的亏硫量较大, 表明其结晶温度较高, 蚀变岩中黄铁矿亏硫量小, 其结晶温度较低。

表 2 黄铁矿的主元素 (%) 和微量元素 (ppm)
Table 2 Major element contents (%) and minor element contents of pyrite (ppm)

样号	产状	Fs	S	化学式	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Cd	Mo	Bi
Szk4-14	黄铁矿多金属硫化物石英脉	44.39	50.84	Fe _{1.0096} S ₂	66.60	86.80	228.97	1624.88	2655.09	31.84	0.42	55.20
Szk16-7	同上	44.88	55.26	Fe _{1.0252} S ₂	11.20	27.80	750.06	594.45	988.46	9.75	4.77	5.30
SyD1d	同上	45.50	51.03	Fe _{1.0237} S ₂	19.60	46.90	417.25	1386.08	2382.39	20.80	0.55	3.90
Szk3-3	含多金属硫化物黄铁矿石英脉	45.57	49.79	Fe _{1.0508} S ₂	8.90	56.70	446.04	1380.94	2610.23	18.77	4.09	14.00
Szk16-5	同上	44.94	48.15	Fe _{1.0715} S ₂	20.60	98.20	1164.46	3938.42	4219.68	39.27	1.09	2.20
Szk16-12	同上	44.17	51.11	Fe _{0.9922} S ₂	11.70	75.40	238.46	3058.42	4398.33	40.90	0.25	0.30
Szk16-7	同上	46.15	51.47	Fe _{1.0234} S ₂	18.90	90.80	1271.43	2390.12	3426.30	30.21	1.39	2.90
Td3-4	同上	45.75	51.50	Fe _{1.0195} S ₂	13.30	27.60	215.02	544.69	2085.47	14.35	0.57	8.80
Td3-8	同上	48.02	51.63	Fe _{1.0678} S ₂	31.20	46.10	397.09	303.47	886.12	5.49	0.40	17.60
TyD4-2	黄铁矿石英脉	47.59	50.95	Fe _{1.0724} S ₂	1.00	33.50	1046.76	1959.49	261.50	2.80	3.06	11.20
Gd1-11	同上	44.81	50.65	Fe _{1.0168} S ₂	35.90	177.00	3011.36	1397.91	168.58	2.63	1.26	69.80
Szk5-4	同上	45.26	49.33	Fe _{1.0537} S ₂	3.60	23.80	347.67	489.16	509.55	0.50	1.81	67.20
Szk16-15	同上	44.74	50.78	Fe _{1.0115} S ₂	35.80	145.00	135.47	773.80	700.35	5.37	7.63	4.10
SyD1cw2-8	同上	45.92	51.00	Fe _{1.0337} S ₂	121.90	57.90	318.00	769.56	2362.54	21.68	0.53	9.50
S3-1	同上	46.16	50.62	Fe _{1.0469} S ₂	1.00	108.00	78.64	249.79	229.40	0.003	0.27	1.20
Tzk3-8	同上	46.05	51.47	Fe _{1.0272} S ₂	5.60	48.90	457.24	266.70	478.65	3.37	9.60	57.50
Tzk23-12	同上	45.21	50.95	Fe _{1.0187} S ₂	9.30	23.00	1258.12	313.38	808.26	6.69	1.36	25.30
Td1-3	同上	45.82	51.80	Fe _{1.0155} S ₂	28.60	49.00	366.79	333.98	2466.92	21.63	0.15	4.00
Td1-4	同上	46.23	50.04	Fe _{1.0607} S ₂	18.50	38.00	284.73	255.38	2913.04	24.22	0.19	2.40
TyD3d-2	同上	47.92	51.03	Fe _{1.0781} S ₂	3.30	21.90	104.07	479.81	542.90	3.47	0.38	1.20
TyD3d-3	同上	45.28	51.14	Fe _{1.0165} S ₂	18.80	160.00	76.52	327.92	1139.19	5.72	0.15	0.30
TyD7CEd1-2	同上	46.92	50.95	Fe _{1.0573} S ₂	15.20	40.00	514.96	185.12	54.47	0.013	0.49	9.80

续表

样号	产状	Co	Ni	Ca	Mg	Mn	P	Sc	As	Au/Ag	Co/Ni	S/Sc(万)
Szk4-14	黄铁矿多金属硫化物石英英脉	115.9	39.30	269.14	23.87	6.65	13.53	1.80	1293.0	0.77	2.91	28.42
Szk16-7	同上	522.3	146.70	702.29	192.48	60.59	18.02	4.70	559.5	0.40	1.38	10.69
SyD ₁ d	同上	787.6	49.80	676.53	91.17	28.91	8.27	2.70	1506.0	0.42	17.98	18.9
Szk3-3	含多金属硫化物黄铁矿石英英脉	138.9	156.60	1291.22	209.02	51.56	17.88	3.70	1779.0	0.16	0.89	13.45
Szk16-5	同上	84.8	62.80	1383.39	130.89	41.02	12.09	1.90	1400.0	0.21	1.35	25.34
Szk16-12	同上	43.6	45.40	209.43	28.45	22.70	8.79	1.40	3884.0	0.16	0.96	36.51
Szk16-7	同上	303.3	219.90	4943.3	1473.21	49.61	14.59	6.10	1408.0	0.21	3.56	8.44
Td3-4	同上	95.9	36.30	805.84	154.06	30.06	13.56	2.60	1371.0	0.48	2.63	19.81
Td3-8	同上	225.8	24.60	604.40	110.87	16.22	8.21	9.90	1418.0	0.68	9.19	5.22
TyD4-2	同上	48.1	109.40	569.40	97.37	19.65	8.57	2.10	159.1	0.03	0.44	24.26
Gd1-11	同上	626.3	680.30	591.20	409.05	15.27	10.09	26.00	113.0	0.20	0.92	1.95
Szk5-4	黄铁矿石英英脉	58.3	96.00	2202.05	556.39	176.17	20.54	2.80	3182.0	0.15	0.61	17.62
Szk16-15	同上	234.1	201.50	594.57	104.14	31.69	6.68	6.20	1236.0	0.25	1.35	8.19
SyD1cw2-8	同上	223.9	66.10	779.41	97.58	34.69	10.42	3.20	2848.0	2.11	3.39	15.94
S3-1	同上	27.8	29.40	777.49	198.02	57.34	7.05	0.30	2194.0	0.01	0.95	168.73
Tzk3-8	同上	140.7	49.80	537.61	116.27	34.10	13.45	5.00	494.4	0.11	2.83	10.29
Tzk23-12	同上	464.5	51.00	695.09	210.02	26.22	22.32	2.70	287.8	0.40	9.11	18.87
Td1-3	同上	69.0	32.30	505.24	127.66	21.08	9.22	1.10	1549.0	0.58	2.14	47.09
Td1-4	同上	30.1	18.70	558.84	104.49	25.24	6.79	0.30	1831.0	0.49	1.61	166.8
TyD3d-2	同上	140.9	57.30	858.52	168.35	33.59	21.74	0.30	252.9	0.15	2.64	170.1
TyD3d-3	同上	265.2	33.40	708.63	134.58	34.08	26.14	0.30	2502.0	0.12	7.94	170.47
TyD7CEd1-2	同上	334.7	257.40	579.53	147.01	18.89	16.25	20.50	2274.0	0.38	1.30	2.49

续表

样号	产状	Co	Ni	Ca	Mg	Mn	P	Sc	As	Au/Ag	Co/Ni	S/Sc(万)
Szk1-5	含多金属硫化物黄铁绢英岩	123.7	188.60	1098.44	107.64	37.12	23.77	0.30	2966.0	0.05	0.66	170.5
Szk4-13	同上	218.8	177.80	1676.86	135.31	42.21	21.86	1.30	1346.0	0.29	1.23	39.08
Szk13-3	同上	165.7	138.30	1413.86	108.81	37.98	10.66	10.40	1194.0	0.80	1.20	4.99
Szk16-9	同上	113.5	117.70	1266.84	12.56	32.84	11.39	7.20	2966.0	0.12	0.96	7.17
Szk16-11	同上	162.7	208.20	689.87	191.23	54.11	56.33	3.30	2788.0	0.03	0.78	15.41
Szk16-13	同上	112.2	126.10	577.19	84.57	35.95	10.26	1.70	2661.0	0.30	0.89	29.58
Szk1-12	黄铁绢英岩	80.7	57.50	1464.44	222.65	48.69	30.40	0.30	2324.0	0.09	1.40	166.53
Szk1-13	同上	905.7	541.80	1732.33	212.38	49.31	48.07	3.40	788.9	0.02	1.67	14.88
Szk4-9	同上	58.5	64.50	746.08	101.16	36.31	31.07	0.30	1797.0	0.19	0.91	168.1
Tzk3-7	同上	74.5	74.10	659.11	161.94	37.79	21.03	1.90	865.9	0.19	1.01	26.58
Td3-3	同上	181.5	112.70	677.64	181.40	17.29	12.03	4.60	1017.0	0.06	1.61	11.02
Td3-6	同上	179.1	280.00	630.70	117.21	16.43	24.95	0.30	741.3	0.07	0.64	171.93
Gd1-11-①	同上	1526.0	538.10	672.02	152.83	23.09	11.14	24.90	275.2	0.33	2.84	2.04
Szk19-11	黄铁矿绿泥石岩	4332.0	36.30	2083.78	371.01	116.93	361.10	38.20	181.7	0.01	119.06	1.27
SyD2	同上	1608.0	86.20	889.37	269.86	26.78	12.81	20.00	581.1	0.07	18.65	2.56
SyD2-3	同上	213.6	93.10	866.26	270.48	24.21	19.92	101.00	76.1	0.36	2.29	0.51
SyD2-5	同上	1203.0	75.10	1268.88	128.10	43.31	14.85	13.30	307.2	0.23	16.02	3.81
Tzk11-10	同上	279.8	59.50	1336.81	287.23	65.57	16.45	2.00	134.5	0.06	4.70	25.75
Szk10-1	绿泥石化斜长角闪岩中黄铁矿	1067.0	691.70	1435.66	246.5	52.28	11.39	14.40	517.5	0.20	1.54	3.59
Szk12-1	绿泥石化黑云二长片麻岩	756.7	55.20	2607.26	634.92	67.37	96.51	59.90	122.8	0.16	13.71	0.83
Szk19-6	绿泥石化斜长角闪岩 标准黄铁矿	4192.0	32.40	1423.49	292.53	80.45	14.34	93.50	108.6	0.09	129.38	0.51

黄测试者: 中国地质科学院岩矿测试研究所 曾慧芳, 1986年。

3 黄铁矿的微量元素

3.1 黄铁矿中微量元素的变化特征

(1) 土岭-石湖金矿区硫化物石英脉中黄铁矿含金1.0—121.9ppm, 平均22.75 ppm, 含银21.9—117.0ppm, 平均63.38ppm, Au/Ag 比值变化于0.01—0.77之间, 平均0.36; 蚀变岩及弱蚀变围岩中黄铁矿含金1.0—82.9ppm, 平均10.20ppm, 含银10.9—168.0 ppm, 平均50.60 ppm, Au/Ag 比值变化于0.01—0.80之间, 平均0.20。可见, 矿石中黄铁矿的Au、Ag平均含量和Au/Ag 平均比值均高于蚀变岩和弱蚀变围岩中黄铁矿的相应值。从矿脉至蚀变岩、弱蚀变围岩, 成矿温度降低, 黄铁矿的Au、Ag含量及Au/Ag 比值也逐渐降低。本区黄铁矿的Au/Ag比值均小于1, 介于0.01—0.8之间, 具有岩浆热液成因特点。

(2) 矿脉黄铁矿中含Co 27.8—787.6ppm, 平均226.44ppm, 含Ni 18.7—680.3ppm, 平均111.75ppm, Co/Ni 比值为0.44—17.98, 平均3.46; 蚀变岩中黄铁矿含Co 58.5—4332.0 ppm, 平均835.94 ppm, 含Ni 32.4—691.7 ppm, 平均178.8ppm, Co/Ni 比值为0.64—129.38, 平均15.29。可见, 从矿脉至蚀变岩, 黄铁矿的结晶温度降低, Co、Ni 含量及Co/Ni 比值升高。据世界其它地区的统计结果, 火山成因的黄铁矿Co/Ni 比值大于10; 沉积成因的黄铁矿Co/Ni 比值小于1; 岩浆热液成因的黄铁矿Co/Ni 比值介于1—5之间。土岭-石湖金矿区矿脉黄铁矿的Co/Ni 比值具岩浆热液成因的特点, 而蚀变岩中黄铁矿的Co/Ni 比值似乎具有火山成因的特点, 可能有代表原岩为火山岩的变质岩之Co、Ni 组分加入。从黄铁矿的Co、Ni 含量来看, 土岭-石湖金矿区的黄铁矿与南非绿岩中金矿床的黄铁矿(含Co 100—700ppm, 含Ni 300—1000 ppm) 有相似之处, 也说明土岭-石湖金矿区有变质组分参与成矿的迹象。黄铁矿中Co、Ni 含量的增高, 使其产生电子心, 显负热电效应^[1]。

(3) 矿脉中黄铁矿的Se 含量为0.3—26.0 ppm, 平均4.8 ppm, S/Se 比值为1.95—170.47 × 10⁴, 平均为44.98 × 10⁴; 蚀变岩(包括弱蚀变的围岩) 中黄铁矿含Se 0.3—101.0 ppm, 平均19.15ppm, S/Se 比值为0.51—170.5 × 10⁴, 平均41.27 × 10⁴。可见, 从矿脉到蚀变岩, 黄铁矿中的Se 含量增加, 而S/Se 比值降低。通常, 黄铁矿中的Se 含量与其结晶温度呈负消长关系。此外, Se 的活动性较As 强, 在流体的前峰部位相对As 而言更为富集, 所以蚀变岩中的黄铁矿S/Se 比值低。

(4) 矿脉黄铁矿中As 含量为113.0—3884.0ppm, 平均为1524.6ppm; 蚀变岩中黄铁矿含As 76.1—2966.0ppm, 平均1131.4ppm。矿石中黄铁矿的As 含量高于蚀变岩及弱蚀变围岩中黄铁矿的As 含量。矿石含Au 高, 蚀变岩含Au 低, 因而黄铁矿的As 含量对Au 有明显的指示性。As 含量的增加使黄铁矿显正热电效应^[1], 因而黄铁矿的热电性是找金的良好标志。

(5) 土岭-石湖金矿区的黄铁矿中Cu、Pb、Zn、Ca、Mg、Mn 的含量均很高, 最低也有n × 10 ppm, 最高达n × 10³ppm, 但这些元素于黄铁矿中呈微细包裹体(如: 黄铜矿、方铅矿、闪锌矿及碳酸盐等) 存在, 对金没有指示意义。黄铁矿中的Cd、Mo、Bi、P 等元素也多呈机械杂质存在。上述这些元素在黄铁矿中的存在, 除反映黄铁矿的结晶环境不稳定外, 均不具有金的指示意义。

表 3 黄铁矿微量元素之相关矩阵
Table 3 Correlation matrix of minor elements in pyrite

El	As	Bi	Sc	Co	Ni	Au	Ag	Ca	Mg	Cu	Zn	Pb	Mn	Cd	P	Mo
As	1.00	-0.23	-0.44	-0.42	-0.22	0.18	0.11	-0.09	-0.13	-0.26	0.42	0.20	0.08	0.36	-0.19	-0.15
Bi		1.00	0.01	-0.03	0.36	0.11	0.17	-0.01	0.03	0.47	-0.15	0.09	0.12	-0.13	-0.06	0.39
Sc			1.00	0.58	0.03	-0.13	-0.11	0.17	0.20	0.04	-0.36	-0.26	0.16	-0.30	0.24	-0.12
Co				1.00	0.07	-0.15	0.13	0.22	0.15	0.06	-0.24	-0.16	0.38	-0.20	0.62	-0.15
Ni					1.00	0.04	0.28	0.09	0.04	0.60	0.13	0.38	-0.10	0.10	-0.08	-0.002
Au						1.00	0.33	-0.14	-0.17	0.30	0.15	-0.02	-0.26	0.23	-0.18	-0.07
Ag							1.00	0.007	-0.02	0.36	0.05	0.13	-0.05	0.06	0.30	0.15
Ca								1.00	0.90	0.06	0.15	0.20	0.50	0.10	0.28	-0.11
Mg									1.00	0.04	-0.04	0.06	0.42	-0.04	0.18	-0.02
Cu										1.00	-0.06	0.23	-0.15	-0.05	-0.12	0.02
Zn											1.00	0.70	-0.10	0.96	-0.11	-0.20
Pb												1.00	-0.07	0.62	-0.08	-0.10
Mn													1.00	-0.14	0.46	-0.05
Cd														1.00	-0.13	-0.19
P															1.00	-0.10
Mo																1.00

相关性临界值

$r_{0.05} = 0.30$

$r_{0.01} = 0.39$

3.2 黄铁矿的微量元素相关分析

(1) 为了研究黄铁矿中微量元素之间的依存关系,探讨黄铁矿结晶时它们的迁移规律,对43个黄铁矿的微量元素(16项)进行相关分析,得相关矩阵(表3)。

43个样品的相关性临界值: $r_{0.05}=0.30$, $r_{0.01}=0.39$ 。从表3可知, $r_{(As-Se)}=-0.44$, $r_{(As-Co)}=-0.42$, $r_{(As-Zn)}=0.42$, $r_{(As-Cd)}=0.36$, $r_{(Se-Co)}=0.58$ 。Se与Co有正相关性,原因是它们同具有在矿石黄铁矿中含量低、而在蚀变岩黄铁矿中含量高的特点。Co相对Ni而言属偏低温组分,在蚀变岩或围岩中(相对低温条件下)形成的黄铁矿相对富含Co(见前述黄铁矿的Co/Ni比值变化特征);Se相对As而言较为活动,多在热液前峰部位富集,故Co与Se有正相关性。As较之于Se不活动,在矿石黄铁矿中相对富集,所以,As与Co、Se均为负相关关系。

镜下观察表明,闪锌矿常穿切交代黄铁矿,黄铁矿破碎越强烈,越易被闪锌矿交代,含锌量也越高。破碎强烈的黄铁矿,常赋存于一些构造交汇部位的矿石中,这些部位的矿石Au含量高,黄铁矿中的As含量也较高,因而,Zn与As在黄铁矿中呈正相关关系。这一规律与矿石中Au、As、Zn之间的正相关关系是一致的。

Ni、Cu与Bi之间有正相关关系 [$r_{(Bi-Ni)}=0.36$, $r_{(Bi-Cu)}=0.47$],因为在热液中Ni更亲Cu,沉淀时多进入黄铜矿中,Bi进入黄铜矿比进入黄铁矿更容易,使黄铁矿(含黄铜矿)中Ni、Bi、Cu含量之间有正消长关系。

Se与Zn的负相关关系 [$r_{(Se-Zn)}=-0.36$]与As-Se关系及As-Zn关系一致。

Au与Ag有正相关关系 [$r_{(Au-Ag)}=0.33$],这决定于它们在热液介质中相似的地球化学行为。

Mn、P与Co有正相关性 [$r_{(Mn-Co)}=0.38$, $r_{(P-Co)}=0.62$],原因是蚀变岩及弱蚀变围岩中的黄铁矿较易混入富含Mn、P的围岩杂质,使蚀变岩中黄铁矿含Mn、P量较高,与Co呈正相关关系。

Ca、Mg、Mn的正相关关系 [$r_{(Ca-Mg)}=0.90$, $r_{(Ca-Mn)}=0.51$, $r_{(Mg-Mn)}=0.42$],它们的地球化学性质相似,在热液作用中Ca、Mg、Mn以碳酸盐形式混入黄铁矿中呈微细包裹体存在。

Zn、Cd、Pb在黄铁矿中的正相关关系 [$r_{(Zn-Cd)}=0.96$, $r_{(Cd-Pb)}=0.62$, $r_{(Zn-Pb)}=0.70$],主要决定于它们相似的地球化学性质。Cd主要在闪锌矿中呈类质同象元素存在,Cd-Zn密切相关。Pb与Zn在热液中的迁移、沉淀基本同步,它们在黄铁矿中的含量有正消长关系,并因此导致Pb与Cd的正相关关系。

(2) 黄铁矿微量元素R型点群分析得元素地球化学谱系如图1所示。在相似性水平为-0.08的条件下,可将全部组分划为两大群:第一大群以As、Zn、Pb、Au、Ag、Cu为代表,包括一系列伴生元素;第二大群以Ca、Mg为代表,包括Mn、Se、Co、P等元素。两大群之间在一定程度上具有负相关关系。第一大群基本代表了成矿元素及其伴生元素,第二大群代表了成矿作用中的杂质元素。

取显著相关性临界值0.3为指标,可将黄铁矿中微量元素分为六个亚群:As为独立元素,是黄铁矿中的类质同象组分,代表第二阶段(黄铁矿石英脉)的成矿作用。Au、Ag组成一个亚群,二者有相似的地球化学性质,在黄铁矿中呈银金矿包裹体,也是第二成矿阶段的产

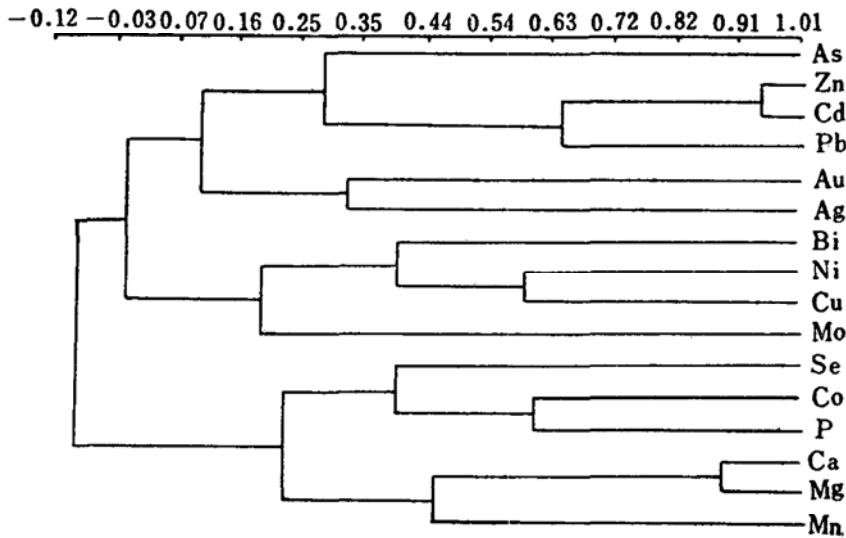


图1 黄铁矿的微量元素地球化学谱系

Fig.1 Geochemical lineage of minor elements in pyrite

物。Ca、Mg、Mn亚群是黄铁矿中含有碳酸盐矿物的反映。Bi、Ni、Cu为一亚群，与黄铁矿中的黄铜矿包裹体有关。Mo代表高温热液的残余。Se、Co、P代表热液前峰部位的组分及低温的围岩混入组分。

4 结论

(1) 根据黄铁矿的硫同位素组成，推断土岭-石湖金矿区成矿热液与区内花岗闪长岩岩浆同源。

(2) 黄铁矿的主成分亏硫，是典型的内生作用产物。结晶温度高的矿脉黄铁矿亏硫多，结晶温度较低的蚀变岩黄铁矿亏硫较少。

(3) 从矿脉至蚀变岩，黄铁矿的Au、Ag含量及Au/Ag比值逐渐降低，暗示黄铁矿的Au、Ag含量及Au/Ag比值与黄铁矿的结晶温度呈正消长关系。

从矿脉至蚀变岩，黄铁矿的Co、Ni、Se含量增加，Co/Ni比值降低。显示黄铁矿的Co、Ni、Se含量与其形成温度有负消长关系，而Co/Ni比值及S/Se比值与温度呈正消长关系。

黄铁矿中的As含量与矿体的Au含量及黄铁矿的结晶温度均呈正消长关系，As对金具有明显的指示性。

(4) 黄铁矿微量元素的正相关元素组合有：Se-Co、As-Zn、Bi-Ni-Cu、Au-Ag、Mn-Co、P-Co、Ca-Mg-Mn、Zn-Cd-Pb，表明各元素组合在成矿作用中有相似的地球化学行为、伴生关系或相同的来源；负相关关系组合有：As-Se、As-Co、Se-Zn，表明各元素组合之元素有相反的地球化学行为或不同的来源。As、Zn、Pb、Au、Ag、Cu等元素代表相对高温的成矿元素组合，Ca、Mg、Mn、Se、Co、P等元素代表相对低温、与围岩关系密切的元素组合。

参 考 文 献

- 1 崔艳合.土岭-石湖金矿区黄铁矿的热电性及其找矿意义.矿床地质研究所刊, 1992, 94—104.
- 2 杨殿范等.太行山土岭-石湖金矿床成矿条件及成因探讨.长春地质学院学报, 1991, 21 (1): 37—42.
- 3 罗镇宽等.浙江遂昌-龙泉地区金银矿床石英和黄铁矿的标型特征研究.矿物岩石, 1985. 5 (3): 77—85.
- 4 徐国凤等.黄铁矿的标型特征及其实际意义.地质论评, 1980, 26(6): 541—547.
- 5 Bralía A. etc. A Revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems. Mineral. Deposita, 1979, 14(3): 353—375.

Chemical Composition of Pyrite from the Tuling-Shihu Gold District and Its Genetic Significance

Cui Yanhe

(Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Key words: pyrite; minor element

Abstract

Located in Lingshou County, Hebei Province, the Tuling-Shihu gold district lies at the exocontact zone between the Yanshanian granodiorite and metamorphic rocks of the Archean Fuping Group. Sulfur isotope composition of pyrite from gold veins suggests that the ore-forming solution of gold was consanguineous with the granodiorite magma. Pyrite in gold veins is depleted in sulfur. From gold ore veins to altered wall rocks, Co, Ni, Se, Co/Ni and S/Se of pyrite increase whereas Au, Ag, As and Au/Ag decrease. The contents of these elements in pyrite and related parameters are good indicators for gold grades of ore veins and sampling locations of pyrite and also functions of ore-forming temperatures.