

山东沂南金场矽卡岩型金铜矿床地质 地球化学特征及矿床成因^{*}

邱检生 王德滋 任启江

(南京大学地球科学系, 南京)

提 要: 金场金铜矿床是沂沭断裂带西侧与中生代次火山作用有关金铜矿床的典型代表。该矿地质地球化学特征的综合研究表明: 其成矿岩体具有富碱、富钾、富轻稀土和大离子亲石元素的特点, 是由成熟度较高的中—下部地壳物质经重熔再生的产物。成矿体系具有高温、弱酸性、偏氧化的介质环境。矿化与斑岩体具密切的内在联系, 成矿热液及成矿物质主要来自岩浆体系。

主题词: 矽卡岩 霏细斑岩 金铜矿床 沂南金场

金场金铜矿床位于沂沭断裂带西侧约 7 km, 处于 郯-葛沟断裂(沂沭断裂西界断裂)与金场-马牧池断裂的交汇部位, 已有近 40 年的开采历史, 累计生产黄金数吨、铜金属数千吨。该矿是沂沭断裂带西侧与中生代次火山作用有关金铜矿床的典型代表。

1 矿区地质概况与矿床地质特征

从矿区地质图上分析(图 1), 该区为一古火山机构, 表现出中心的黑云母花岗闪长岩体呈近似圆形, 周围发育着放射状、环状裂隙, 内有霏细斑岩及闪长玢岩岩脉。矿区范围内出露的地层主要为中、上寒武统不纯质灰岩、砂岩、页岩。岩浆岩为一套同源不同阶段形成的复式次火山杂岩, 根据各岩性之间的相互穿截关系, 这套次火山杂岩自早至晚依次为闪长玢岩、黑云母花岗闪长岩、角闪霏细斑岩、霏细斑岩、霏细岩等, 其中与成矿关系最为密切的岩石类型为霏细斑岩, 该岩石的 Rb-Sr 等时年龄为 $154.8 \times 10^6 \text{a}$ 。矿田范围内的断裂构造主要为 EW 向、NW 向和 NNE 向, 其中 EW 向、NW 向构造通常为成矿前构造, 但在成矿期则又重新活动, 而 NNE 向构造一般为成矿期构造。

区内围岩蚀变广泛, 除接触交代作用外, 尚有热力变质作用及稍后的热液交代作用。接触交代作用发生在霏细斑岩与寒武系碳酸盐岩石接触带附近, 外蚀变带宽一般为 5~30 m, 内蚀变带不发育, 一般不超过 1 m。接触交代作用形成的矽卡岩自早至晚依次为石榴石矽卡岩、石榴石透辉石矽卡岩和绿帘石透辉石矽卡岩, 其中石榴石透辉石矽卡岩是主要含矿岩石, 该岩石具细粒花岗变晶结构, 矿物成分以透辉石为主, 其次有石榴石、绿泥石及少量绿帘石和碳酸

^{*} 本文由国家自然科学基金和南京大学金属矿床成矿作用开放实验室研究基金联合资助
邱检生, 男, 29 岁, 讲师, 博士, 主要从事火山-次火山作用与成矿关系研究。邮政编码: 210093
1995-5-9 收稿, 1995-10-16 修改回

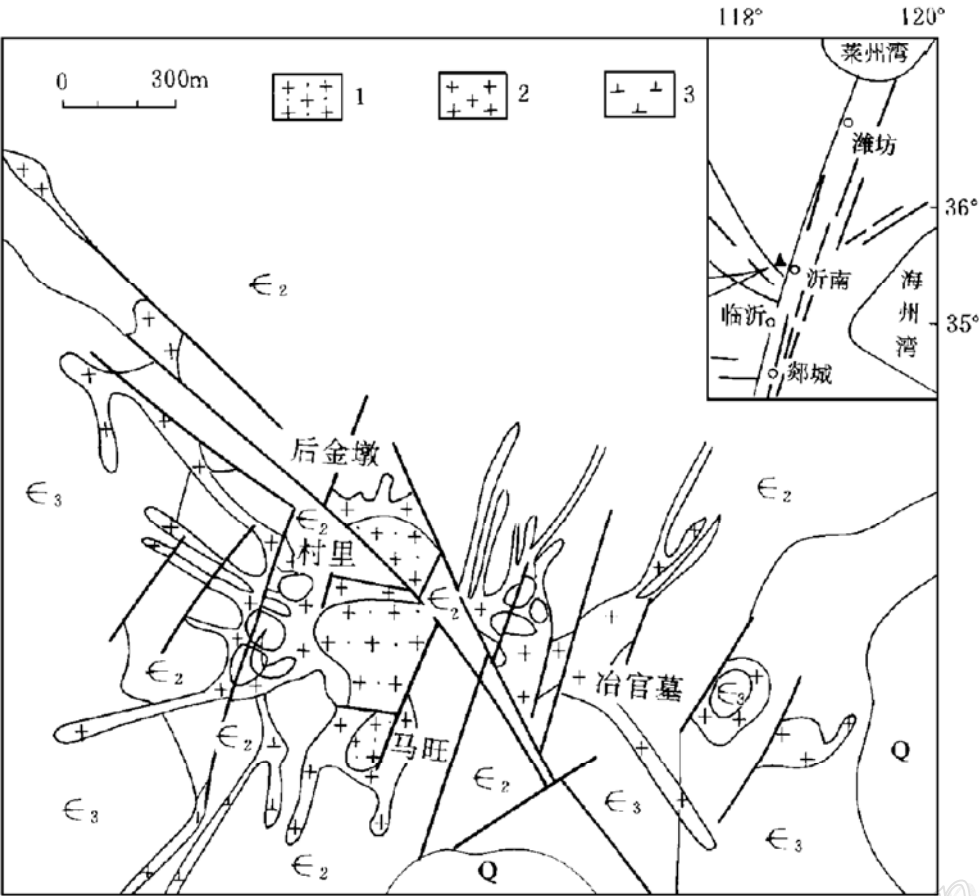


图 1 金场金铜矿床地质略图

Q—第四系； ϵ_3 —上寒武统； ϵ_2 —中寒武统；1—黑云母花岗闪长岩；2—霏细斑岩；3—闪长玢岩

Fig. 1. Geological sketch map of the Jinchang gold-copper deposit.

Q—Quaternary； ϵ_3 —Upper Cambrian； ϵ_2 —Middle Cambrian；1—Biotite granodiorite；
2—Felsophyre；3—Diorite phophyrite.

盐,当其中的绿泥石、碳酸盐矿物增多时,金铜矿化就越强,当其中的石榴石颗粒增大且含量居多时,则为透辉石石榴石矽卡岩,含矿性较差,且以磁铁矿为主。绿帘石透辉石除有时有镜铁矿外,一般不含矿。矿化有关的蚀变——矽卡岩化仅沿接触带和层间构造发生,而其它蚀变作用与矿体的形成关系不大。

矿床的形成大致经历了岩浆侵位时的热接触变质作用期、岩浆期后的热接触交代作用(即矽卡岩化)期及晚期的热液交代作用期,其中矽卡岩化期是区内的主要成矿期,晚期的热液交代作用仅形成少量的含铜硫化物石英脉。矿体主要赋存在霏细斑岩与灰岩的接触带附近,并严格地受到环状、放射状裂隙的控制。矿体的形态多呈似层状、透镜状,延长 42~50 m,延深 50~100 m,厚度为 0.5~15.1 m^[1]。矿石类型主要为含金铜矽卡岩和含金铜磁铁矿矽卡岩。随着埋藏深度的增加,矿体规模逐渐变小,金铜品位逐渐降低,矿石类型由含金铜矽卡岩逐渐变为磁铁矿和含铜磁铁矿。矿石矿物以黄铜矿、磁铁矿、黄铁矿为主,此外,尚有斑铜矿、辉铜矿、砷黝铜矿等。矿石中的金矿物主要为自然金,约占 90%左右,其次为银金矿和金银矿。自然金多呈细粒状、脉状或条带状产于黄铜矿、砷黝铜矿和斑铜矿的晶隙或裂隙中。矿石构造主要为浸

染状和块状。矿石中 有用组分以金、铜为主,其次为钼、铁和硫。

2 成矿岩体地球化学

区内与成矿密切相关的霏细斑岩,其基质具有特征的由长英质微晶组成的霏细结构,斑晶矿物以钾长石为主,此外尚有石英、角闪石、黑云母、斜长石等。斑晶钾长石的 X 粉晶衍射分析显示其种属主要为正长石,具有较低的有序度($S=0.10$),表明岩体定位较浅,具有较快的冷却史。黑云母贫铝($Al_2O_3=12.82\% \sim 13.47\%$)、富钛($TiO_2=3.50\% \sim 4.50\%$), MF 值较大($0.62 \sim 0.74$),属镁质黑云母。其晶体化学式中均不出现 Al^V ,但有一定的 Ti^{4+} (表 1),显示其结晶深度较浅。角闪石富钙而贫碱($CaO>10\%$, $Na_2O+K_2O<4\%$),晶体化学式中 Si^{4+} 均在 6.50 以上, $(Na+K)_A>0.50$, $Ti^{4+}<0.05$, MF 值变化于 $0.46 \sim 0.71$ (表 2),种属主要为浅闪石或浅闪石质角闪石。其 Al_2O_3 含量变化于 $7.62\% \sim 11.53\%$,多数在 10% 以下; $Si/(Si+Ti+Al)$ 比值变化于 $0.739 \sim 0.818$ 之间,多数大于 0.775,参照姜常义等^[2]对火成岩中角闪石的研究结果,显示本区角闪石主要为壳源成因。

表 1 金场成矿岩体中黑云母的电子探针成分(%)

Table 1. Electron microprobe analyses of biotite from ore-forming stocks of the Jinchang gold-copper deposit

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^①	FeO	MnO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Si ⁴⁺
D-6	38.42	3.51	12.82	6.47	11.63	0.21	13.15	0.16	9.30	5.72
Yn-33(1)	38.66	3.50	13.06	8.30	8.99	0.22	14.53	0.47	9.18	5.64
Jc-3	36.19	4.50	13.47	8.25	12.09	0.16	11.48	0.41	9.13	5.46

样号	Ti ⁴⁺	Al ³⁺	Al ^Ⅳ	Al ^Ⅴ	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	MF
D-6	0.39	2.25	2.25	—	0.73	1.45	0.03	2.92	0.05	1.77	0.66
Yn-33(1)	0.38	2.25	2.25	—	0.91	1.10	0.03	3.16	0.13	1.71	0.74
Jc-3	0.51	2.39	2.39	—	0.94	1.53	0.02	2.58	0.12	1.76	0.62

注:① Fe₂O₃ 系利用电价差值法计算结果, $MF=Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+}+Mn^{2+})$,电子探针数据由中国地质大学(北京)电子探针室测定,后文同此

成矿岩体的化学成分具有富碱、富钾特征,其 K_2O+Na_2O 值变化于 $6.67\% \sim 10.25\%$, K_2O 含量介于 $2.02\% \sim 7.75\%$ (表 3),均高于中国同类岩石的相应值。岩石中 SiO_2 与 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 MgO 、 CaO 之间存在明显的负消长关系,显示这套次火山杂岩是同源岩浆分异演化的产物。岩石的 A/NKC 值均小于 1,分异指数(DI)较低,变化于 $61.61 \sim 90.91$ 之间,与同熔型花岗岩类相似。微量元素上,这套次火山杂岩富大离子亲石元素,其 Rb、Sr、Ba 等元素的含量相当于下部地壳^[6]的数倍至数十倍,而亲铜元素(Cu、Zn),尤其是亲铁元素(Co、Ni)的含量则明显偏低(图 2,表 3)。随着岩浆分异演化程度的增高,岩石中的金含量逐渐增高,霏细斑岩中金含量相当于酸性岩维氏值的 3~4 倍,这为矿质的来源提供了有利条件。岩石的 ΣREE 变化于 $79.55 \times 10^{-6} \sim 273.84 \times 10^{-6}$,轻、重稀土分馏明显, $LREE/HREE$ 比值介于 $8.79 \sim 31.07$;有中—弱的铕呈负异常, δEu 值变化于 $0.45 \sim 0.87$ (表 3),稀土配分曲线呈明显的右倾斜形(图 3)。根据岩体中黑云母种属为镁质黑云母,岩石的 A/NKC 值小于 1, DI 值偏低,轻、重稀土分馏明显,以及铕亏损不甚强烈等特征,表明岩体的成因类型应属同熔型。

表 2 金场成矿岩体中角闪石的电子探针成分(%)

Table 2. Electron microprobe analyses of amphibole from ore-forming stocks of the Jinchang gold-copper deposit

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Si ⁴⁺	Ti ⁴⁺	Al ³⁺
Jc-9(1)	42.22	1.70	11.53	14.05	0.34	10.85	11.04	1.64	0.65	6.50	0.20	2.09
Jc-9(2)	44.25	1.45	11.10	10.55	0.10	14.32	10.80	2.04	0.79	6.58	0.16	1.95
D-6	42.72	1.39	8.78	17.34	0.76	10.25	10.89	2.10	1.32	6.64	0.16	1.61
Yn-33(1)	42.99	1.19	9.30	19.37	0.72	9.39	11.13	2.30	1.36	6.59	0.14	1.68
Yn-33(2)	42.85	0.91	8.38	18.53	0.69	9.30	10.93	2.32	1.22	6.72	0.11	1.55
Jc-3	46.11	1.67	7.62	16.14	0.43	11.40	11.12	1.83	1.05	6.91	0.19	1.35

样号	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Fe ²⁺	Mn ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	MF	$\frac{\text{Si}}{\text{Si}+\text{Ti}+\text{Al}}$	N ⁺ +K ⁺
Jc-9(1)	1.50	0.59	1.81	0.04	2.19	1.82	0.49	0.13	0.57	0.739	0.62
Jc-9(2)	1.42	0.53	1.31	0.01	3.18	1.72	0.59	0.15	0.71	0.757	0.74
D-6	1.36	0.25	2.25	0.10	2.37	1.81	0.63	0.26	0.50	0.790	0.89
Yn-33(1)	1.41	0.27	2.48	0.09	2.15	1.83	0.68	0.27	0.46	0.784	0.95
Yn-33(2)	1.28	0.27	2.43	0.09	2.18	1.84	0.71	0.24	0.46	0.802	0.95
Jc-3	1.09	0.26	2.02	0.05	2.55	1.79	0.53	0.20	0.55	0.818	0.73

注: $MF=Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+}+Mn^{2+})$,分子式中离子系数以 23 个氧原子计算结果

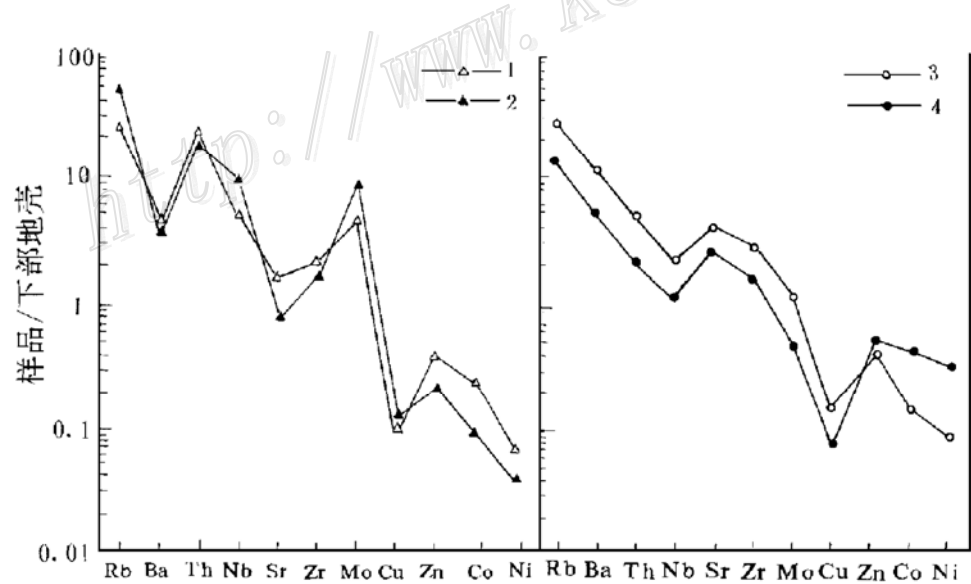


图 2 金场次火山杂岩微量元素相对于下部地壳的配分型式
1—闪长玢岩;2—黑云母花岗闪长岩;3—霏细斑岩;4—霏细岩

Fig. 2. Lower crust-normalized trace element patterns of subvolcanic complexes in the Jinchang gold-copper deposit.
1—Diorite porphyry; 2—Biotite granodiorite; 3—Felsophyre; 4—Felsite.

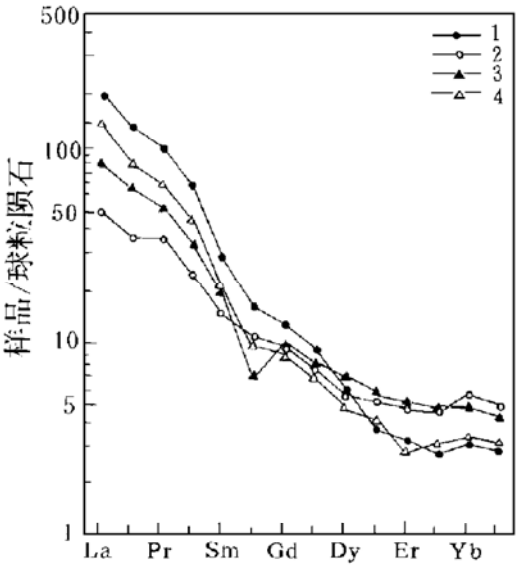


图 3 金场次火山杂岩稀土元素球粒陨石标准化配分型式

1—黑云母花岗闪长岩;2—闪长玢岩;3~4—霏细斑岩

Fig. 3. Chondrite-normalized REE patterns of subvolcanic complexes in the Jinchang gold-copper deposit.

1—Biotite granodiorite;2—Diorite porphyry;
3~4—Felsophyre.

表 3 金场次火山杂岩岩石化学成分(%)、微量元素和稀土元素丰度(10^{-6})

Table 3. Chemical compositions (wt%), trace element and REE abundances (10^{-6}) of subvolcanic complexes in the Jinchang gold-copper deposit

样号	Jc-9	Jc-17	D-5	D-6	Jc-13	Yn-33	Jc-27
岩性	闪长玢岩		黑云花岗闪长岩	霏细斑岩			霏细岩
SiO ₂	61.16	61.08	61.92	69.29	70.68	69.64	73.07
TiO ₂	0.46	0.49	0.49	0.28	0.16	0.23	0.10
Al ₂ O ₃	15.21	15.40	14.93	14.44	13.56	14.35	12.29
Fe ₂ O ₃	2.41	2.09	1.91	1.28	1.18	1.09	0.41
FeO	3.07	3.25	2.21	1.48	3.18	2.21	2.10
MnO	0.09	0.09	0.10	0.05	0.04	0.04	0.03
MgO	4.20	4.26	1.89	1.19	0.73	0.93	0.36
CaO	4.78	4.16	3.18	1.86	1.43	1.81	1.20
Na ₂ O	4.65	5.17	3.64	4.50	4.19	4.58	2.03
K ₂ O	2.02	2.18	6.61	4.76	4.30	4.28	7.75
P ₂ O ₅	0.06	0.04	0.11	0.03	0.01	0.04	0.01
Na ₂ O+K ₂ O	6.67	7.35	10.25	9.26	8.49	8.86	9.78
DI	61.61	64.03	77.42	85.72	84.82	84.84	90.91
A/NKC	0.82	0.84	0.79	0.91	0.96	0.93	0.88
Rb	70.4	70.8	136.3	101.8	130.7	105.3	245.3
Sr	609.4	678.0	949.0	741.6	337.8	674.3	160.5
Ba	794	822	1756	1138	529	907	462
Th	2.4	3.9	5.1	13.5	22.2	13.7	20.9
Nb	6.9	6.9	13.3	15.8	26.7	16.8	50.7
Zr	113.3	110.1	207.0	159.7	139.9	167.3	109.9
Cu	7.2	11.5	14.2	8.4	8.4	20.8	9.7
Mo	0.4	1.0	1.0	0.4	3.4	2.2	6.5
Zn	47.7	56.3	37.7	31.6	31.6	49.7	17.4
Co	16.0	18.9	5.7	7.8	7.8	6.8	3.3
Ni	49.2	56.0	13.9	9.2	9.2	9.1	5.5
Au(10^{-9})	1.50	3.80	5.5	13.5	13.2	15.80	30.0
ΣREE	84.99	79.55	273.84	187.48	140.74	187.44	
LREE/HREE	8.79	9.28	31.07	24.97	13.85	21.39	
δEu	0.87	0.70	0.76	0.70	0.45	0.77	

注：微量元素采用 XRF 方法测定，Au 用原子吸收法测定，稀土元素用 ICP 方法测定。主量元素、Au 和稀土元素由南京大学地球科学系中心实验室分析，其余微量元素由南京大学现代分析中心测定

3 成岩物质来源

为确定金场成矿岩体的物质来源,我们对与成矿密切相关的霏细斑岩进行了 Sr、Nd 同位素综合测定(表 4、表 5)。由表 4 数据采用最小二乘法计算获得霏细斑岩的矿物-全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $(154.8\pm0.3)\times10^6\text{a}$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.7112 ± 0.0001 ,数据点在等时线图上形成很好的线性相关,相关系数为 0.9999。根据 Rb-Sr 等时线年龄,采用 Faure^[7]和 Jacobsen^[8]的参数和公式,计算了岩体的 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(见表 4、5)。

表 4 金场霏细斑岩 Rb-Sr 同位素分析结果
Table 4. Rb-Sr isotopic compositions of felsophyre in the Jinchang gold-copper deposit

样 号	岩 性	Rb(10^{-6})	Sr(10^{-6})	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	误差	$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$
Yn-33	霏细斑岩	103.75	682.39	0.440	0.712489	0.000023	103.48
Jc-13	霏细斑岩	164.91	340.95	1.400	0.713813	0.000021	91.03
D-6	霏细斑岩	全岩	101.91	744.78	0.396	0.711789	93.67
D-6(ap)		磷灰石	9.39	506.79	0.054	0.711538	
D-6(Bi)		黑云母	625.87	41.53	44.011	0.805864	

$t=(154.8\pm0.3)\times10^6\text{a}$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.7112\pm0.0001$, $r=0.9999$

注：南京大学现代分析中心测定

表 5 金场霏细斑岩 Sm-Nd 同位素分析结果

Table 5. Sm-Nd isotopic compositions of felsophyre in the Jinchang gold-copper deposit

样 号	岩 性	Sm(10^{-6})	Nd(10^{-6})	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
D-6	霏细斑岩	4.67	32.65	0.0865	0.511774	-14.68
Yn-33	霏细斑岩	4.45	30.74	0.0876	0.511633	-17.64

注：南京大学现代分析中心测定

由表 4、表 5 中数据可看出：金场霏细斑岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值较之壳幔混源岩石的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值(变化于 $0.704\sim0.709$ ^[7]) 偏高,表明其成

岩物质应主要来源于地壳。岩石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值明显偏低,变化于 $-14.68\sim-17.64$ 之间。如此低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,反映其源区最可能为中、下部地壳成熟度较高的古老变质基底,据江博民等^[9]对区内泰山群变质杂岩的 Sr、Nd 同位素研究资料,将其 Sr、Nd 同位素比值计算到 $154.8\times10^6\text{a}$ 时的组成投影在 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 关系图上(图 4),可以看出,霏细斑岩的投影点非常靠近泰山群花岗质片麻岩的投影区,由此可见:霏细斑岩应主要为区内花岗质片麻岩类变质基底经重熔再生作用的产物。

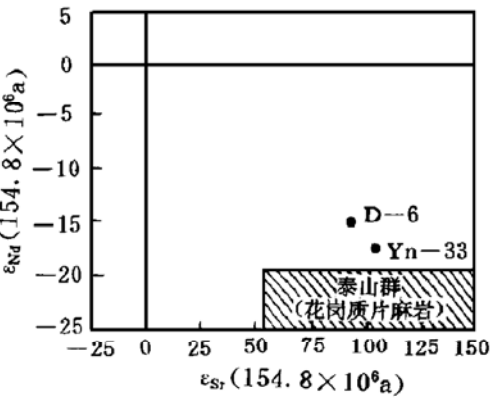


图 4 金场霏细斑岩 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 关系图
Fig. 4. $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ versus $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram of felsophyre in the Jinchang gold-copper deposit.

表 1 钼矿床和铜(钼)矿床辉钼矿的 Re-Os 年龄

Table 1. Re-Os ages of molybdenite from the molybdenum and copper-molybdenum deposits

矿床	样号	主要矿物组合	取样量 (mg)	Re(2σ) (μg/g)	¹⁸⁷ Re(2σ) (μg/g)	¹⁸⁷ Os(2σ) (ng/g)	模式年龄 (10 ⁶ a)	等时线年龄 (10 ⁶ a)	围岩或岩体年龄 (10 ⁶ a)
兰家沟斑岩型钼矿床	L-1	Py+Mo+Q	130	31.04±0.74	19.43±0.46	60.02±0.65	188±5	186.5±0.7	赋矿细粒似斑状花岗岩的 Rb-Sr 等时线年龄 154 ^① ; 伴有辉钼矿的云英岩(化)白云母 K-Ar 同位素年龄 188.8 ^②
	L-3	Py+Mo+Q	90	45.13±1.01	28.25±0.64	86.50±1.14	186±5		
	L-5	Py+Mo+Q	90	44.74±0.57	28.01±0.36	86.39±1.83	188±5		
	L-17	Py+Mo+Q	499.1	4.7±0.1	3.00±0.06	9.3±0.2	192±5		
	L-18	钼精矿	81.5	60.6±0.7	37.94±0.44	115.6±2.0	185±4		
杨家杖子砂卡岩型钼矿床	Y-15-1	Mo+Q	101.4	34.4±0.5	21.54±0.35	67.0±1.8	190±6		粗粒花岗岩中云英岩的白云母 K-Ar 同位素年龄 188.8 ^② ; 钙矽卡岩中金云母(脉)的 K-Ar 同位素年龄 211 ^②
	Y-15-2	Py+Mo+Q	147.1	33.8±0.3	21.16±0.30	65.1±0.7	187±2		
	Y-17	Mo+Q	183	53.1±1.2	33.24±0.40	104.1±1.9	191±6		
肖家营子砂卡岩型钼矿床	X-5	Mo+Q	40	119.58±0.59	74.86±0.59	217.71±5.4	177±5		辉长辉绿岩和细粒似斑状闪长岩的 K-Ar 同位素年龄分别为 177 和 113 ^③
小寺沟斑岩-砂卡岩型钼(钨)矿床	S-17	Mo+Cp+Py+Q	100	37.14±0.5	23.25±0.31	51.18±0.70	134±3		花岗闪长斑岩的 K-Ar 同位素年龄 129 ^②
寿王坟斑岩-砂卡岩型钼(钨)矿床	SH-13	Mo+Py+Cp+Q	400	10.51±0.18	6.58±0.11	16.02±0.30	148±4		花岗闪长岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄 130 ^⑧
滦源大湾斑岩-砂卡岩型钼矿床	DW95-1	钼精矿	297.8	17.14±0.32	10.73±0.20	25.44±1.22	144.4±7.4		
大庄科爆破角砾岩筒型钼矿床	DC-95-1	Mo+Q	314.6	15.97±0.16	10.00±0.10	24.15±1.08	147.1±6.63		石英二长岩 K-Ar 同位素年龄 126 ^②
	DC-95-1'	斑点状结晶较大辉钼矿	279.1	20.19±0.32	12.64±0.20	30.03±2.20	144.7±10.7		
	DC-95-2	Mo±Py+Q	275.6	11.24±0.20	7.03±0.14	16.89±0.59	146.4±5.9		
	S528-1	Py+Cp+Mo+Q	500	1.24±0.04	0.78±0.03	27.52±0.30	2109		
中条山铜矿峪变斑岩型铜(钼)矿床	S528-2	Py+Cp+Mo+Q	500	1.08±0.02	0.68±0.01	23.58±0.29	2076	2108±32 ^③	绛县群铜矿峪组变流纹质凝灰岩单颗粒石 U-Pb 年龄 2166±26 ^③ ; 铜矿峪变流纹质凝灰岩单颗粒石 U-Pb 年龄 2145 ^③ ; 单颗粒石离子探针质谱法年龄 2115±6 ^③ ; 含铜变石英斑岩常规铀石 U-Pb 年龄 2195±64 ^③ ; 铜矿峪矿床 5 号矿体容矿岩石(变石英二长斑岩+变石英晶屑凝灰岩)的 Rb-Sr 等时线年龄 1778±27 ^⑤
	S602	Mo+Q	30	152.2±3.6	93.3±2.20	3332±37	2140		
	5147-3	Py+Mo+Cp+Q	2000	0.172±0.0030	0.1074±0.002	3.81±0.14	2098		
	S601	Mo+Q	150	31.26±0.13	19.57±0.29	646±10	1980±22		
篦子沟沉积变质型铜(钼)矿床	N24	Mo+Q	10	579.20±7.40	362.60±4.60	11600±170	1919±37		中条群篦子沟组火山岩单颗粒石 U-Pb 年龄 2060±3 ^③
芬兰 Kuittila 石英脉型钼矿点 ^[13]	EN93-Kul	Mo+Q	25~50	85.0		2526	2817±8		Kuittila 英云闪长岩的锆石 U-Pb 年龄 2745±10 ^[14]
立陶宛 Kabeliai 花岗岩中使变型铜(钼)矿点 ^[13]	SW93-KA1	Py+Cp+Mo+Q	25~50	2.393		37.5	1503±7		Kabeliai 花岗岩的锆石 U-Pb 年龄 1505±11 ^[15]

注:表中矿物名称代号:Py—黄铁矿;Mo—辉钼矿;Cp—黄铜矿;Q—石英;①余和勇、王吉瑞、辽宁杨家杖子钼田钼矿成矿时代讨论,全国钼矿学术讨论会论文集,河南地质(增刊),1985;②权恒、韩庆云、辽西、冀北地区与中生代火山-侵入岩有关多金属成矿地质条件及成矿远景研究,1990;③陈文明等, Polygenetic mineralization of the metamorphosed Tongkuanyu porphyry copper deposit in the Zhongtiao mountains, Shanxi, China. The 9th Symposium of international association on the genesis of ore deposits. 1994, Vol.1, 第 387~388 页

4 成矿体系的物理化学性质

金场矿区矽卡岩中主要造岩矿物的包裹体爆裂测温显示其成矿温度变化于 306~420 ℃ 之间。本文对区内成矿物理化学条件的估算主要基于矽卡岩中共生矿物对的化学成分研究。

4.1 矽卡岩中石榴石、单斜辉石的成分特征

表 6 列出了区内矽卡岩中石榴石的探针分析结果,利用电价差值法^[3]对探针成分中 FeO 的换算表明,石榴石中铁主要以 Fe³⁺ 形式存在,而 Fe²⁺ 含量甚微。化学成分上 MnO、MgO 的含量很低,而明显富钙(CaO=31.91%~34.21%),显示本区矽卡岩中的石榴石为钙系榴石。根据化学成分计算的端员组分表明:其 GrO 摩尔百分数变化于 31.39%~49.40%,And 摩尔百分数变化于 49.47%~67.84%。在本区主要含矿矽卡岩即石榴石透辉石矽卡岩中,石榴石常发育环带构造,对这种环带石榴石的探针分析表明自内环至外环,Fe₂O₃ 趋于降低,Al₂O₃ 趋于升高,即内环较之外环 And 摩尔分数所占比例大,反映在环带石榴石形成过程中,f_{O₂} 有渐低趋势。

表 7 列出了区内矽卡岩中单斜辉石的探针分析结果。由表 7 知,本区单斜辉石明显富钙(CaO=23.59%~25.27%),根据化学成分计算的端员组分显示其种属主要为次透辉石(Di=56.05~83.40)。早期矽卡岩中的单斜辉石相对富 FeO,其 K_p 值较大;而主要矽卡岩矿化阶段其 FeO 变化于 4.81%~7.94%,相对较低,K_p 值介于 0.19~0.35。对照扎里科夫^[13]的研究结果:表明本区自早至晚,成矿体系的酸度有自高至低的演化趋势。

4.2 成矿体系的 pH 值及 f_{O₂} 估算

(1)pH 值:利用林文蔚根据热力学原理导出的共生单斜辉石-石榴石酸度计算公式^[4],对本区主要含矿矽卡岩形成的 pH 值计算结果表明:四对共生矿物所计算的 pH 值极为接近,其值变化于 5.89~6.05(表 8)。由于用于计算的共生矿物对中没有覆盖钙铁榴石高的样品,故成矿体系的 pH 值变化范围可能更大,上限值应比计算值高,但计算结果总体可以反映主成矿阶段体系处于弱酸性环境。

(2) f_{O₂}:根据区内主要矿石类型(即矽卡岩型矿石)的矿物共生组合,结合形成温度及共生单斜辉石-石榴石的成分特征,利用林文蔚导出的共生单斜辉石-石榴石氧逸度计^[5],粗略估算出本区主要矽卡岩矿化阶段的 f_{O₂} 值变化于 10^{-22.5}~10⁻²⁵(t=400~350℃),f_{O₂} 值较高,表明矿床形成于相对氧化的介质环境,这与矿石矿物中常见磁铁矿的特征相吻合。

表 8 金场矿区主要矽卡岩矿化阶段 pH 值计算结果

Table 8. Calculated pH values of main skarn-mineralization stage in the Jinchang gold-copper deposit

样 号	石榴石(%)			单斜辉石(%)			计算温度 (℃)	pH	K' _p
	Gro	And	Sp	Di	Hed	Joh			
JC-10	39.88	59.59	0.53	56.05	42.64	1.31	400	5.99	0.5041
JC-22	41.91	57.27	0.82	75.48	22.23	2.29	380	5.90	0.2132
JC-36	44.04	55.46	0.50	72.67	25.75	1.58	350	5.89	0.2955
JC-45	39.35	59.78	0.87	81.72	17.71	0.57	380	6.05	0.1448

注:K'_p= $\frac{N_{Fe}^{Cpx}}{1-N_{Fe}^{Cpx}} \bigg/ \frac{N_{Fe}^{Gro}}{1-N_{Fe}^{Gro}}$,计算所采用的温度系共生矿物对中石榴石的爆裂温度,计算过程中的压力为 0.5×10⁸ Pa

5 矿床成因讨论

5.1 成矿热液及成矿物质来源

区内与金铜矿化密切共生的磁铁矿的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化于 $1.3\text{‰}\sim 4.3\text{‰}$ (表 9),利用 Anderson 提出的磁铁矿-水之间氧同位素平衡分馏方程,计算出与其平衡水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值变化于 $8.0\text{‰}\sim 10.8\text{‰}$,表明主矿化阶段成矿热液主要为岩浆热液。矽卡岩化后期含硫化物石英阶段中石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 8.1‰ , δD 为 -87‰ ,计算的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 -0.4‰ ,说明矽卡岩化后期的含硫化物石英矿化阶段有一定量的天水混入。由于本区的主体矿化为矽卡岩矿化,因此区内与成矿有关的热液主要为岩浆热液。

区内硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $1.9\text{‰}\sim 3.5\text{‰}$ (表 10),极差为 1.6‰ , $\delta^{34}\text{S}$ 值弥散度较小,在硫同位素组成的频率直方图上具有“塔式”分布效应,表明硫主要为深源,即主要来自岩浆体系。

表 9 金场金铜矿床磁铁矿和石英的氢、氧同位素组成(‰)

Table 9. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of magnetite and quartz in the Jinchang gold-copper deposit

样号	样品特征	被测矿物	形成温度 ($^{\circ}\text{C}$) ^①	矿物 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	包裹体水 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$	计算平衡水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ ^②
Jc-25	含铜磁铁矿矿石	Mt	410	3.6		10.5
Jc-47(3)	含铜磁铁矿矿石	Mt	430	1.3		8.0
Jc-48(4)	块状磁铁矿矿石	Mt	450	4.3		10.8
Jc-49	含铜磁铁矿矿石	Mt	410	3.2		10.0
Jc-11	石英脉(含少量硫化物)	Q	260	8.1	-87	-0.4

注:①对磁铁矿(Mt)系采用爆裂温度,对石英(Q)系采用均一温度;②对磁铁矿,采用 $\ln\alpha_{\text{Mt-H}_2\text{O}} = -1.47 \times 10^6 T^{-2} - 3.70^{[10]}$;对石英,采用 $1000 \ln\alpha_{\text{Q-H}_2\text{O}} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.4^{[11]}$;由南京大学金属矿床成矿作用开放实验室测定

表 10 金场金铜矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 测定结果(‰)

Table 10. Sulfur isotopic compositions of sulfides in the Jinchang gold-copper deposit

样号	矿物	$\delta^{34}\text{S}$	样号	矿物	$\delta^{34}\text{S}$
Jc-8	Py	3.4	Jc-40	Py	2.8
Jc-25	Cp	1.9	Jc-47(3)	Cp	2.0
Jc-32(1)	Cp	3.5	Jc-49(1)	Cp	3.4

注:Py—黄铁矿,Cp—黄铜矿;南京大学金属矿床成矿作用开放实验室测定

5.2 成矿机制

前面的研究表明:金场金铜矿床成矿热液及成矿物质主要来自岩浆体系。区内远离矿体无蚀变的古生代地层的灰岩及白云质灰岩,其金含量变化于 $1 \times 10^{-9} \sim 4 \times 10^{-9}$,平均约 1.57×10^{-9} ,低于或仅相当于同类岩石的克拉克值,且在区域范围内未出现金的负异常带,这同样显

示矿质主要由岩体提供。成矿体系所处的高温、弱酸性偏氧化的介质环境有利于矿质呈氯的络合物形式迁移^[12],当富含成矿元素的流体与抗压强度较低的不纯质灰岩接触时,由于介质环境的差异及气液交代作用的结果,促使了含铜、金络合物的分解,从而导致了矽卡岩型金铜矿床的形成。总之,金场金铜矿床的形成是以成矿母岩为中心,在成矿过程中,密切受到岩体内外的构造、岩性及物理化学条件的制约。矽卡岩型矿体仅是矿体空间赋存的主要形式,而次火山岩控矿才是成矿的本质所在。

参 考 文 献

- 1 陈常富,郭志远,胡京宇,蒋明霞. 山东沂南金厂金铜矿床构造、岩浆演化与成矿模式. 地质找矿论丛,1995,10(1):9~15
- 2 姜常义,安三元. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义. 矿物岩石,1984,4(3):1~9
- 3 郑巧荣. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} . 矿物学报,1983,(1):55~62
- 4 林文蔚. 矽卡岩矿床中共生单斜辉石-石榴石酸度计及矽卡岩矿床的酸度相. 地质学报,1990,(1):53~61
- 5 林文蔚. 矽卡岩矿床共生单斜辉石-石榴石氧逸度计及主要金属矿化类型矽卡岩生成的氧逸度条件. 岩石矿物学杂志,1990,(3):255~262
- 6 Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell Scientific Publication, 1985,1~95
- 7 Faure G. Principles of isotope geology. John Willey & Sons, 1986
- 8 Jacobsen S R. Sm-Nd isotopic evolution of chondrite. Earth Planet Sci. Lett., 1980, 50:139~155
- 9 Jahn B M, Auvray B, Shen Q H, Liu D Y, Zhang Z Q, Dong Y J, Ye X J, Zhang Q Z, Cornichet J, Mace J. Archaean crustal evolution in China: The Taishan Complex, and evidence for juvenile crustal addition from long-term depleted mantle. Precambrian Research, 1988, 38:381~403
- 10 Anderson A T. Oxygen isotope thermometer of mafic igneous rock. J. Geol., 1971, 79:715~729
- 11 Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T. Oxygen isotope exchange between quartz and water. J. Geophys. Res., 1972, 77:3057~3067
- 12 Seward T M. The transport and deposition of gold in hydrothermal system. Gold's 82, The geology, geochemistry and genesis of gold deposit, 1984, 165~181
- 13 Жариков В А, Аксюк А М, Коржинский М А. Влияния кислотности раствора на распределение железа между пироксеном и гранатом (по экспериментальным данным). В кн. "Проблемы Физико-химической петрологии". "Наука", 1979, (4):46~60

GEOLOGICAL-GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND GENESIS OF THE JINCHANG SKARN TYPE GOLD-COPPER DEPOSIT, YINAN COUNTY, SHANDONG PROVINCE

Qiu Jiansheng, Wang Dezi and Ren Qijiang

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Key words: skarn, felsite porphyry, gold-copper deposit, Jinchang, Yinan County, Shandong province

Abstract

The Jinchang gold-copper deposit is a typical deposit related to Mesozoic subvolcanic activities to the west of Yishu deep fault zone. The outcropped strata in the mining district are mainly Middle-Upper Cambrian series which are lithologically impure limestone, sandstone, shale etc. Igneous rocks, including (from early to late) diorite porphyry, biotite granodiorite, amphibole felsite porphyry, felsite porphyry and felsite, are a suite of subvolcanic complexes resulting from differentiation of the same primary magma. Among them the felsite porphyry, whose Rb-Sr isochron age equals 154.8×10^6 a, is closely related to mineralization. Orebodies are located mainly in the contact zone between felsite porphyry and limestone. Chemically, the ore-forming stocks are rich in alkali, potassium, LREE and LILE, with Σ REE, LREE/HREE and δ_{Eu} equal to 79.55×10^{-6} , 273.84×10^{-6} , $8.79 \sim 31.07$ and $0.45 \sim 0.87$ respectively, which are comparable to corresponding data of the syntectonic type granitoids in southeastern China. The Sr and Nd isotopic compositions of the felsite porphyry are $I_{Sr} = 0.7112$, $\epsilon_{Nd}(t) = 14.68 \sim 17.64$. On the $\epsilon_{Sr}(t) - \epsilon_{Nd}(t)$ diagram, their plots are close to plots of granitic gneisses of Taishan Group. It is thus conjectured that the ore-forming stocks must have been the syntectonic products of middle-low crustal materials with higher maturity. According to chemical composition investigation of paragenetic garnets and clinopyroxenes in skarns, it is shown that the pH and f_{O_2} values of the ore-forming stage equal $5.89 \sim 6.05$ and $10^{-22.5} \sim 10^{-25}$ ($t = 400 \sim 350^\circ\text{C}$). Investigations have shown that there exists a close relationship between mineralization and porphyry. The $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values of ore-forming fluids vary from 8.0‰ to 10.8‰, and $\delta^{34}\text{S}$ values of sulfides range from 1.9‰ to 3.5‰. These data suggest that the ore-forming fluids were composed mainly of magmatic water, and the ore-forming fluids and materials were chiefly derived from the magmatic system.

欢迎订阅 1997 年《矿床地质》

《矿床地质》是中国地质学会矿床地质专业委员会和中国地质科学院矿床地质研究所联合主办的学术刊物,国内外公开发行。

《矿床地质》是有关矿床地质学的综合性学术期刊,任务是报道矿床地质基础理论,金属、非金属矿床地质特征,与矿床有关的岩石学、矿物学、成矿学、构造地质学与大地构造学、地球化学、同位素地质学等的研究成果和科学实验成果,有关新技术、新方法,地质新知、书著评介及国内外有关学科动态、展望、消息等。

《矿床地质》被列为中文核心期刊。被国内外一些文摘类期刊和数据库摘录,如国内的《中国地质文摘》、《中国科技期刊文摘》、《中国科技引文索引》,美国的《化学文摘》、《矿物文摘》、《地质文摘》、《冶金采矿文摘》,俄罗斯的《文摘杂志》,法国《文献通报》、英国《地学文摘》等。

《矿床地质》刊文面向全国,内容丰富,可读性强,是广大地质工作者不可少的参考资料。真可谓一册《矿床地质》在手,全国矿床地质资料全有。

《矿床地质》邮发代号:82—459,全国各地邮局均可订阅,1997 年定价 7 元。