

西藏甲玛铜多金属矿床成矿系统元素的活动性及质量平衡

杨欢欢¹, 唐菊兴², 林 彬¹, 应立娟², 郎兴海¹, 郑文宝²

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059;

2. 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘 要:运用质量平衡方法,研究西藏甲玛铜多金属矿床中位于角岩和矽卡岩接触带内的矽卡岩化角岩被流体交代蚀变形成矽卡岩过程中元素的迁移特征和流体性质。对两类样品分别进行主量、微量、稀土元素分析,并运用等浓度线方程及其推导方程分别判断在交代蚀变过程中元素的带入、带出特点及元素的活动性,进而推断流体特征。结果表明:主量元素只有 Al_2O_3 、 Na_2O 和 K_2O 为带出元素, SiO_2 、 Fe_2O_3 和 CaO 为带入元素且带入量较大;微量元素 W、V、Cr 带入量较大,Bi、Ni、Pb、Ga 带入量中等;稀土元素除 Pr 和 La 外均为带入元素,其带入序列趋势由强至弱依次为 Eu、Er、Yb、Dy、Ho、Gd、Tm、Lu、Tb、Sm、Nd、Ce;成矿元素 Ag、Cu、Mo、Pb、Zn 为带入元素,带入序列趋势由强至弱依次为 Mo、Ag、Cu、Pb、Zn;蚀变过程元素 K、Na、Li、Be、Zr 被带出与 F、Cl、OH、 CO_2 等组成络合物存在于溶液中;带入元素 Cu、Mo、Pb、Zn 以硫化物形式存在于矿区内,上述硫化物中硫、铁为低价态,而贫氧的流体有利于硫、铁以低价态出现。总之,推断蚀变流体富 F、Cl、OH、 CO_2 ,具有富含硫和铁元素且贫氧的特征。

关键词:铜多金属矿床;元素迁移;成矿流体;交代蚀变作用;矽卡岩;甲玛;西藏

中图分类号:P618.41

文献标志码:A

Element Mobility and Mass Balance of Ore-forming System in Jiama Copper Polymetallic Deposit of Tibet

YANG Huan-huan¹, TANG Ju-xing², LIN Bin¹, YING Li-juan², LANG Xing-hai¹, ZHENG Wen-bao²

(1. School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment of Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Mass balance method was used to study the characteristics of element transfer and fluid property while skarnization hornfels were replaced into skarns at the contact zone between skarnization hornfels and skarns in Jiama copper polymetallic deposit of Tibet. The major, trace and rare earth elements of two different types of samples were analyzed, and the bring-in and bring-out of elements under the metasomatic alteration were estimated by the isocon equation and its derivation, and the characteristics of fluid were discussed. The results show that only Al_2O_3 , Na_2O and K_2O among the major elements are bring-out, SiO_2 , Fe_2O_3 and CaO are bring-in and the quantity is large; the bring-in quantities of trace elements W, V and Cr are large, while the quantities of Bi, Ni, Pb and Ga are medium; rare earth elements are bring-in except for Pr and

收稿日期:2013-10-11

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2011CB403103);中国地质调查局青藏专项项目(12120113093700)

作者简介:杨欢欢(1988-),女,黑龙江哈尔滨人,理学硕士研究生,E-mail:836653361@qq.com。

La, and the bring-in sequence trend is Eu, Er, Yb, Dy, Ho, Gd, Tm, Lu, Tb, Sm, Nd and Ce from strong to weak; the ore-forming elements Ag, Cu, Mo, Pb and Zn are bring-in, and the bring-in sequence trend is Mo, Ag, Cu, Pb and Zn from strong to weak; K, Na, Li, Be and Zr in the process of alteration are brought out to form the complex with F, Cl, OH and CO₂ existing in the solution; the bring-in elements Cu, Mo, Pb and Zn in the mining area exist in the form of sulfides, in which S and Fe are low valence, and the fluid with deficient oxygen is favorable for the S and Fe with low valence. In general, it is concluded that alteration fluid is rich in F, Cl, OH and CO₂, and rich in the elements S and Fe and deficient in oxygen.

Key words: copper polymetallic deposit; element transfer; ore-forming fluid; metasomatic alteration; skarn; Jiama; Tibet

0 引言

矿化蚀变过程中,元素质量迁移常会导致元素的富集贫化,具有固有的内在规律性^[1]。对蚀变岩石进行物质组成变化的研究有助于了解成矿流体系统特征及其成矿作用过程^[2]。目前,对矿床成矿体系元素迁移规律的研究较多,并且取得了丰硕成果^[1-3]。

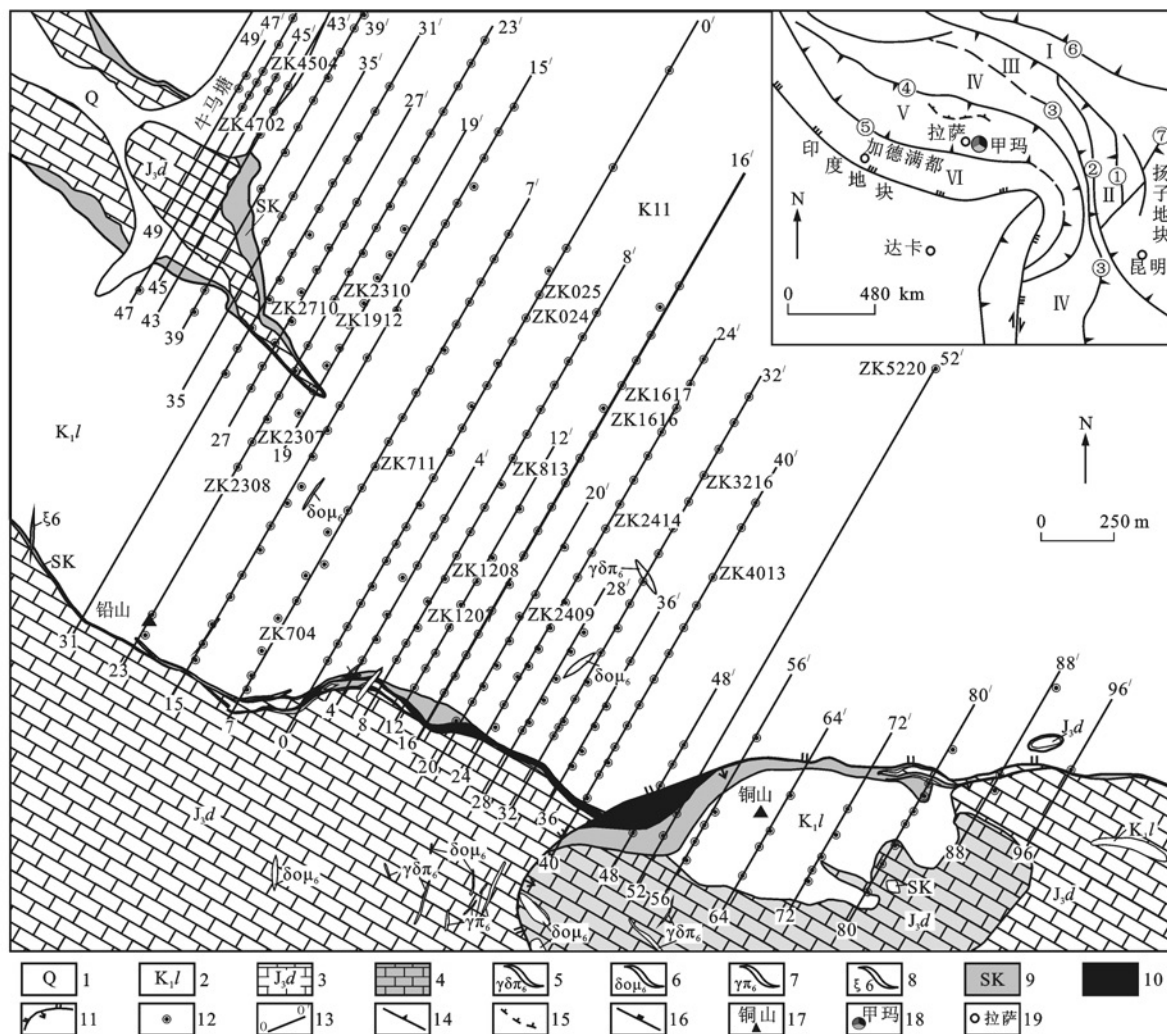
西藏甲玛铜多金属矿床是冈底斯成矿带上新评价的超大型矿床,矿区内发育大规模的矽卡岩。与传统意义的典型矽卡岩矿床不同的是,甲玛矿区矽卡岩主要受早白垩世林布宗组角岩、板岩和晚侏罗世多底沟组大理岩之间的层间构造带所控制。岩体与大理岩之间形成传统类型矽卡岩的同时,外围沿角岩的岩性界面形成层状、似层状的远端矽卡岩^[4]。角岩和矽卡岩之间的过渡地带,角岩常伴有明显的矽卡岩化,甚至被交代为矽卡岩。角岩进一步被交代为矽卡岩的现象与传统矽卡岩形成理论相悖,是甲玛矿区有别于其他斑岩成矿系统所特有的蚀变现象。王登红等认为,这种矽卡岩是岩浆流体交代早期热变质形成的角岩并使之发生矽卡岩化形成的^[5]。岩浆流体与围岩发生交代的过程中常伴随着大量的元素迁移现象,研究元素迁移规律可以了解甲玛矿区矽卡岩的形成过程。对灰岩、大理岩等碳酸盐发生矽卡岩化及其所发生的物质组分交换的研究较多^[6-7],而对角岩的矽卡岩化关注较少,但它确实与很多重要矿床类型有关。川西乌拉溪钨铍矿区自岩体向外依次形成岩体边缘混合花岗岩带、矽卡岩带、矽卡岩化大理岩带和矽卡岩化角岩带^[8];广东大顶铁矿床西南部的角岩或弱矽卡岩化角岩层发现了层控矽卡岩型锡矿床和接触交代矽卡岩型铅锌矿化^[9]。笔者运用质量平衡方法,针对甲玛矿区角岩在矽卡岩化过程中元素迁移特征进行研究,并用定量方法计算元素的迁出和迁入,以进一步丰富矽卡

岩型成矿理论,为蚀变与成矿的关系研究提供参考和借鉴。

1 研究区地质概况

甲玛铜多金属矿床位于西藏特提斯构造域冈底斯—念青唐古拉(地体)板片中南部,是产出在冈底斯成矿带东南段的超大型矿床(图 1)^[10-14]。冈底斯—念青唐古拉地体南缘的构造线总体走势近 EW 向,由于区域长期走滑效应,次级构造线多呈 NWW 向,推覆构造发育。甲玛矿区受控于由北向南的推覆构造及由南向北的滑覆构造。矿区推覆构造由一系列倒转褶皱组成:红塔背斜、牛马塘背斜以及夏工普向斜。矿区出露地层为一套被动陆缘期碎屑—碳酸盐岩系,主要由下白垩统林布宗组(K₁l)灰、暗灰色砂岩和板岩互层,灰黑色粉砂岩夹碳质泥页岩,黑色斑点板岩及灰白色绢云母板岩,上侏罗统多底沟组(J₃d)灰黑色中厚层灰岩,发育不同程度的大理岩化以及在牛马塘一带出露的少量第四系组成。矿区岩浆岩发育,分布广泛,主要分布在雅江断裂以北,是冈底斯火山岩浆弧的重要组成部分。该岩浆岩在浅部呈脉状产出,其深部存在含矿斑岩体。主要岩浆岩类型有花岗斑岩、黑云母二长花岗斑岩、黑云母花岗斑岩、花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩、闪长玢岩、角闪辉绿岩、石英辉长岩等^[15]。其中,含矿花岗闪长斑岩中辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为(14.78±0.33)Ma^[16]。

甲玛斑岩系统由 4 种矿体类型构成:①产于斑岩中的钼(铜)矿体,主要呈筒状产于 0~40 线北边,赋矿斑岩主要为花岗闪长斑岩与二长花岗斑岩,目前已有钻孔(ZK2414)连续见矿厚度达 544.73 m,铜平均品位为 0.23%,钼平均品位为 0.052%;②产于矽卡岩中的铜多金属矿体,为斑岩矿床系统的重要组成部分,主矿体呈层状、厚板状产于下白垩统林布宗



1—第四系残坡积物、冲洪积物;2—下白垩统林布宗组砂板岩、角岩;3—上侏罗统多底沟组灰岩、大理岩;4—矽卡岩化大理岩;5—花岗岩闪长斑岩脉;6—石英闪长玢岩脉;7—花岗斑岩脉;8—花岗细晶岩脉;9—矽卡岩;10—矽卡岩型矿体;11—滑覆构造断裂;12—钻孔;
13—勘探线及编号;14—板边带及俯冲方向;15—洋壳仰冲推覆前缘;16—主边界推覆断裂;17—矿区地名;18—甲玛矿区;
19—地名;图件引自文献[17]

图1 西藏甲玛矿区地质图

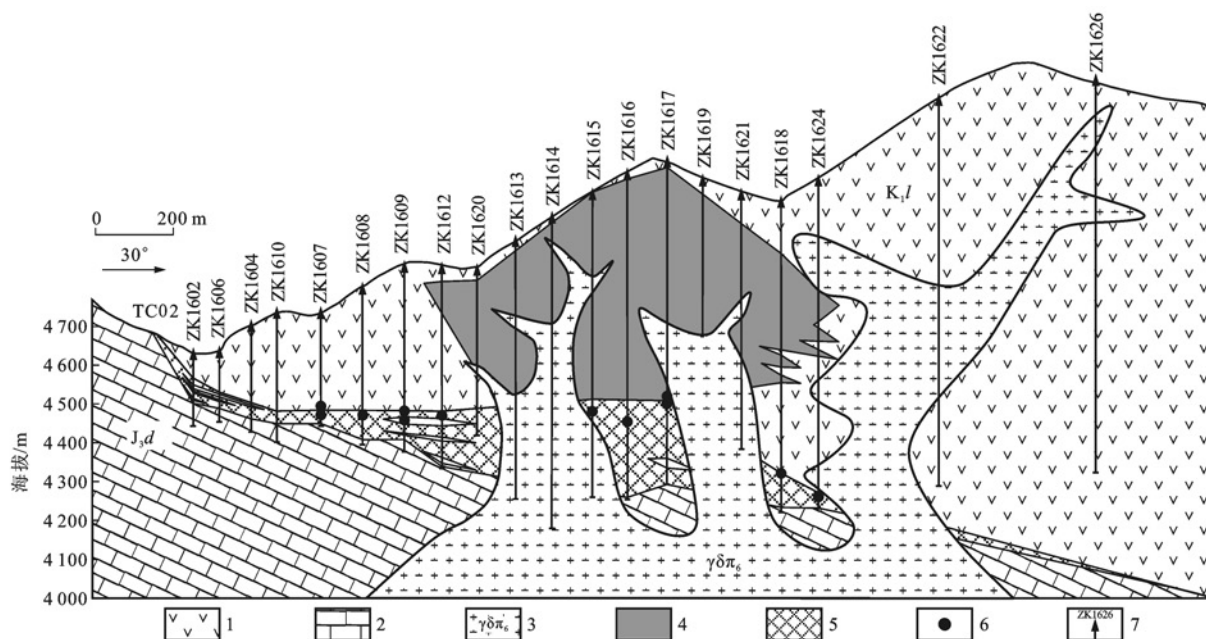
Fig. 1 Geological Map of Jiama Mining Area in Tibet

组砂板岩和角岩(矿体顶板)与上侏罗统多底沟组灰岩和大理岩(矿体底板)的层间因推覆-滑覆构造引起的扩容空间内,矽卡岩型矿体中I号主矿体走向300°,延长大于3 000 m,倾向30°,延伸大于2 500 m(未控制边界),矿体产状受推覆构造控制,具明显上陡下缓特点,上部矿体倾角一般为50°~70°,为铅锌(金银)矿石组合,下部矿体倾角一般小于20°,为铜钼(金银)矿石组合,目前控制的该矿体最大连续厚度约为328.98 m(ZK1218 钻孔),其Cu 平均品位为0.49%,Mo 平均品位为0.073%;③产于角岩中的铜钼矿体,呈筒状产于0~40 线斑岩矿体上部角岩中,目前该类矿体最大厚度达826 m(ZK3216 钻孔),Cu 平均品位0.24%,Mo 平均品位0.054%;

④脉状独立金矿体,目前已在 ZK4702、ZK8807、ZK4504 等多处发现该类矿体,尤其是在 ZK4504,产于闪长玢岩中的 Au 矿体总厚度为23.06 m,其平均品位为 8.59×10^{-6} 。

2 样品的采样和分析

矽卡岩化角岩多以矽卡岩矿物脉状充填形式发育,交代程度由弱至强表现出细脉状、脉状、角砾状构造,其交代界限较规则且交代范围较窄,矽卡岩矿物粒度较细。本文样品沿矿体勘探线方向的角岩和矽卡岩的过渡部位采集的,主要在16号勘探线上的探矿钻孔岩芯中采集矽卡岩和矽卡岩化角岩样品(图2)。矽卡岩样品均为钙铁石榴子石矽卡岩,矿物

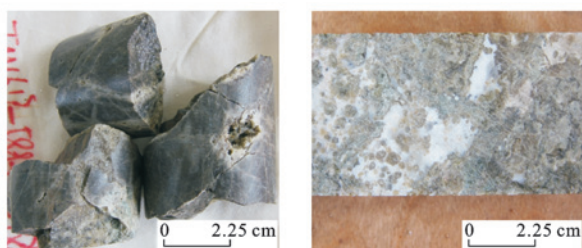


1—下白垩统林布宗组砂板岩、角岩;2—上侏罗统多底组灰岩、大理岩;3—斑岩体;4—角岩型铜多金属矿体;
5—矽卡岩型铜多金属矿体;6—采样位置;7—钻孔位置;图件引自文献[18]

图2 甲玛矿区16号勘探线剖面及采样位置

Fig. 2 No. 16 Prospecting Line Profile and Sampling Locations of Jima Mining Area

成分主要为钙铁石榴子石,呈暗红棕色,晶形不明显,偶见少量硅灰石,样品矿化弱。其中,矽卡岩化角岩采自角岩和矽卡岩接触带处,呈灰绿色—黄绿色,块状构造[图3(a)]。矿物成分已基本蚀变为石榴子石等矽卡岩矿物,矿化弱,岩石仍保留原来角岩致密脆性的特征[图3(b)]。



(a) 矽卡岩化角岩

(b) 钙铁石榴子石矽卡岩

图3 甲玛矿区矽卡岩化角岩和矽卡岩照片

Fig. 3 Photos of Skarnization Hornfels and Skarn in Jima Mining Area

样品的主量、稀土元素及微量元素含量测试是在西南冶金地质测试中心完成的。主量元素分析方法见文献[19]。稀土元素采用过氧化钠熔融分解样品,稀土元素在碱性介质中随基体元素一起沉淀,通过过滤分离掉大量熔剂,再将沉淀用酸溶解,运用 NexION 300x 等离子体质谱仪测定。微量元素 As、Sb 采用王水溶解,抗坏血酸-硫脲作为还原剂,运用 AFS2202E 原子荧光光度计测定;Ag、Sn 采用摄谱法,运用 802W 二米平面光栅光谱仪测定(Ag

质量分数大于 5×10^{-6} ,采用王水溶解,用 ICE3500 原子吸收分光光度计测定,Sn 质量分数大于 100×10^{-6} ,采用过氧化钠熔融分解样品,用 JP-2D 示波光谱仪测定);W、Mo 采用过氧化钠熔融分解样品,运用 JP-2D 示波光谱仪测定;Nb、Ta、Hf、Zr 采用过氧化钠熔融分解样品,用 NexION 300x 等离子体质谱仪测定;其余微量元素则采用盐酸+硝酸+氢氟酸+高氯酸溶解,用 iCAP6300 全谱直读等离子发射光谱仪或 NexION 300x 等离子体质谱仪测定。分析测试结果见表1。

3 质量平衡理论和方法

Gresens 提出以实际岩石化学来分析交代过程中体积和浓度变化的方法,并导出 Gresens 方程。此方法被广泛应用到热液蚀变作用研究的众多领域,但由于 Gresens 方程涉及体积和质量两个相互关联的变量,无独立的方法确定其中一个^[20],所以 Grant 在此基础上对原方程进行了修正,得出等浓度线(Isocon)方程^[21]。

等浓度线方程体现了蚀变岩和原岩中化学成分浓度的线性关系。在蚀变岩和原岩的浓度图解上,等浓度线是一条穿过原点的直线,等浓度线的斜率表示原岩发生蚀变后与蚀变岩质量的比值,其他元素在该图上的投点与等浓度线的偏移量就是该元素的浓度变化。Grant 对 Gresens 方程修正得到的等

表 1 甲玛矿区矽卡岩与矽卡岩化角岩主量、稀土元素和微量元素分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Major, Rare Earth and Trace Elements for the Skarn and Skarnization Hornfels in Jiama Mining Area

岩性	钙铁石榴子石矽卡岩										矽卡岩化角岩			
样品编号及 平均值	ZK1607- 256.11	ZK1608- 317.2	ZK1609- 386.6	ZK1612- 381.2	ZK1615- 574.5	ZK1616- 647.06	ZK1617- 625	ZK1618- 699.58	ZK1624- 817.7	平均值	ZK1617- 607.82	ZK1607- 242	ZK1609- 416.4	平均值
$w(\text{SiO}_2)/\%$	38.08	39.56	37.00	37.51	32.29	30.10	44.46	37.32	28.08	36.04	40.49	72.80	59.50	57.60
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	8.69	13.74	2.55	6.17	0.69	0.48	0.99	6.60	1.43	4.59	14.31	11.40	18.20	14.64
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	15.28	9.18	23.15	17.56	15.18	23.11	15.01	15.28	20.63	17.15	9.68	3.83	0.47	4.66
$w(\text{FeO})/\%$	0.75	0.67	0.71	0.65	0.95	2.72	0.60	0.52	0.65	0.91	0.95	1.17	0.90	1.01
$w(\text{MgO})/\%$	1.63	1.60	1.02	0.27	0.18	0.37	10.03	1.83	0.54	1.94	1.64	0.96	1.98	1.53
$w(\text{CaO})/\%$	31.92	30.32	31.24	31.46	34.70	35.35	19.82	31.58	38.13	31.61	28.92	1.14	6.90	12.32
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	0.051	0.420	0.091	0.180	0.083	0.060	0.054	0.080	0.130	0.130	0.560	1.230	3.550	1.780
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	0.100	0.100	0.067	0.160	0.098	0.076	0.085	0.097	0.130	0.100	0.140	3.330	5.330	2.930
$w(\text{TiO}_2)/\%$	0.290	0.630	0.190	0.410	0.067	0.064	0.073	0.310	0.140	0.240	0.580	0.550	0.770	0.630
$w(\text{MnO})/\%$	0.65	0.70	0.40	0.64	0.38	0.40	0.32	0.44	0.17	0.46	0.56	0.03	0.09	0.23
$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	0.230	0.360	0.290	0.450	0.160	0.120	0.079	0.280	0.057	0.220	0.140	0.110	0.140	0.130
$w(\text{As})/10^{-6}$	22.50	20.00	58.20	62.50	25.60	58.20	73.50	31.00	45.20	44.07	38.41	8.70	11.60	19.57
$w(\text{Sb})/10^{-6}$	1.32	4.50	0.62	1.46	0.81	0.49	0.62	1.21	0.31	1.26	9.02	1.13	0.91	3.69
$w(\text{Sn})/10^{-6}$	21.00	10.20	31.00	28.50	50.80	35.40	41.20	16.80	18.70	28.16	14.92	2.36	2.77	6.68
$w(\text{Ag})/10^{-6}$	0.36	0.18	0.11	0.56	2.35	0.94	1.82	0.17	0.19	0.74	0.50			0.50
$w(\text{Bi})/10^{-6}$	0.87	6.05	1.49	16.10	51.70	21.40	16.20	2.50	2.68	13.22	39.18	2.26	0.94	14.13
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	8.47	8.88	5.04	19.20	15.70	8.32	6.86	12.00	62.90	16.36	29.80	256.00	183.00	156.27
$w(\text{Be})/10^{-6}$	0.41	3.13	0.41	0.99	0.54	2.13	1.10	1.67	0.81	1.24	20.01	1.61	2.68	8.10
$w(\text{Cd})/10^{-6}$	0.40	0.90	0.19	0.43	1.29	1.62	1.62	0.43	1.03	0.88	0.53	0.28	0.76	0.52
$w(\text{Co})/10^{-6}$	6.16	7.76	5.45	4.34	1.62	20.00	3.19	4.90	1.76	6.13	8.43	14.90	10.70	11.34
$w(\text{Cr})/10^{-6}$	109.00	66.90	114.00	89.80	110.00	71.80	30.70	73.70	1580	91.60	85.46	46.70	63.00	65.05
$w(\text{Cs})/10^{-6}$	7.18	7.56	6.85	2.60	0.86	1.72	21.50	7.88	2.51	6.52	20.51	14.60	14.00	16.37
$w(\text{Cu})/10^{-6}$	80.20	32.00	36.60	399.00	1 708.00	1 152.00	727.00	103.00	169.00	489.58	307.10	495.00	245.00	349.03
$w(\text{Ga})/10^{-6}$	9.82	10.60	10.60	9.58	10.50	16.10	7.62	12.40	14.70	11.31	13.75	14.40	18.30	15.48
$w(\text{Hf})/10^{-6}$	0.38	1.81	0.34	0.72	0.52	0.41	0.92	0.52	0.27	0.65	2.15	4.77	5.46	4.13
$w(\text{In})/10^{-6}$	1.04	0.48	3.41	1.58	3.41	4.41	3.17	1.09	2.14	2.30	0.95	<0.05	<0.05	0.95
$w(\text{Li})/10^{-6}$	4.95	6.21	4.84	4.19	2.89	2.56	12.50	5.44	2.81	5.16	7.66	23.60	16.10	15.79
$w(\text{Mo})/10^{-6}$	37.10	240.00	23.60	59.60	363.00	509.00	481.00	81.20	288.00	231.33	118.30	59.40	93.80	90.50
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	3.28	7.60	2.09	6.69	1.13	0.44	0.89	4.00	0.79	2.99	12.61	10.10	14.00	12.24
$w(\text{Ni})/10^{-6}$	52.60	87.10	33.50	25.30	1.32	12.50	11.00	15.50	5.64	27.16	25.79	35.80	36.30	32.63
$w(\text{Pb})/10^{-6}$	45.50	24.40	18.30	23.00	16.40	10.60	37.00	34.90	8.81	24.33	26.71	9.19	19.30	18.40
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	7.79	7.56	5.28	9.62	5.44	4.25	8.28	8.73	5.02	6.88	12.39	254.00	254.00	173.46
$w(\text{Sc})/10^{-6}$	11.50	18.10	8.15	10.80	1.84	2.49	1.40	12.50	2.22	7.67	16.76	11.60	15.70	14.69
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	6.16	68.80	6.08	14.90	31.80	8.50	8.42	17.90	22.80	20.59	42.50	64.20	150.00	85.57
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	0.22	0.72	0.04	0.42	0.04	0.02	0.03	0.23	0.06	0.20	1.29	0.67	0.92	0.96
$w(\text{Th})/10^{-6}$	2.83	9.91	1.96	3.98	1.27	0.67	0.93	5.06	1.26	3.10	17.20	11.30	15.20	14.57
$w(\text{Tl})/10^{-6}$	0.21	0.16	0.13	0.15	0.51	0.11	0.10	0.25	0.11	0.19	0.17	2.08	1.60	1.28
$w(\text{U})/10^{-6}$	2.61	7.13	4.69	6.77	19.00	16.40	7.35	5.84	11.50	9.03	11.30	2.33	2.29	5.31

续表 1

岩性	钙铁石榴子石矽卡岩										矽卡岩化角岩			
样品编号及 平均值	ZK1607- 256.11	ZK1608- 317.2	ZK1609- 386.6	ZK1612- 381.2	ZK1615- 574.5	ZK1616- 647.06	ZK1617- 625	ZK1618- 699.58	ZK1624- 817.7	平均值	ZK1617- 607.82	ZK1607- 242	ZK1609- 416.4	平均值
$w(V)/10^{-6}$	198.00	245.00	93.30	103.00	66.30	142.00	42.40	107.00	79.20	119.60	102.90	77.50	95.50	91.97
$w(W)/10^{-6}$	34.10	220.00	112.00	268.00	795.00	816.00	477.00	201.00	771.00	410.47	118.80	38.00	11.50	56.10
$w(Zn)/10^{-6}$	65.50	54.70	48.20	41.70	33.50	94.10	42.00	40.70	26.50	49.67	77.75	22.50	52.40	50.88
$w(Zr)/10^{-6}$	84.00	124.00	50.70	118.00	17.60	11.10	15.10	72.80	18.60	56.88	143.72	190.00	220.00	184.57
$w(Y)/10^{-6}$	38.90	33.70	27.50	34.60	4.76	6.10	6.57	18.00	9.50	19.96	21.92	22.80	29.00	24.57
$w(Ce)/10^{-6}$	55.70	50.30	22.20	28.00	10.50	7.57	7.59	20.90	9.29	23.58	80.05	47.00	45.70	57.58
$w(Dy)/10^{-6}$	6.74	5.91	4.66	4.72	0.69	0.36	0.58	3.58	1.14	3.15	4.67	3.92	5.23	4.61
$w(Er)/10^{-6}$	4.48	3.65	2.78	2.92	0.52	0.30	0.45	2.14	0.83	2.01	2.87	2.38	3.06	2.77
$w(Eu)/10^{-6}$	1.86	1.30	1.09	1.41	0.26	0.14	0.17	1.17	0.32	0.86	1.30	1.04	1.10	1.15
$w(Gd)/10^{-6}$	7.67	6.96	5.54	5.49	0.80	0.48	0.72	4.13	1.20	3.66	6.94	4.33	5.36	5.54
$w(Ho)/10^{-6}$	1.32	1.09	0.88	0.91	0.14	0.07	0.11	0.67	0.23	0.60	0.86	0.82	1.05	0.91
$w(La)/10^{-6}$	5.48	26.70	10.40	14.70	5.95	2.94	2.75	9.27	3.91	9.12	37.75	22.20	21.20	27.05
$w(Lu)/10^{-6}$	0.54	0.47	0.29	0.34	0.07	0.03	0.05	0.28	0.11	0.24	0.36	0.34	0.45	0.38
$w(Nd)/10^{-6}$	31.20	31.60	19.30	23.90	4.36	2.52	3.68	16.30	4.95	15.32	42.69	21.10	25.20	29.66
$w(Pr)/10^{-6}$	3.00	5.31	3.02	3.80	0.88	0.43	0.59	2.51	0.75	2.25	7.89	5.49	6.39	6.59
$w(Sm)/10^{-6}$	5.93	5.91	4.41	4.47	0.71	0.36	0.55	3.58	0.94	2.98	6.80	4.51	5.39	5.57
$w(Tb)/10^{-6}$	0.99	0.86	0.71	0.71	0.10	0.05	0.09	0.54	0.16	0.47	0.77	0.70	0.86	0.78
$w(Tm)/10^{-6}$	0.52	0.46	0.32	0.33	0.06	0.03	0.05	0.28	0.10	0.24	0.34	0.34	0.44	0.37
$w(Yb)/10^{-6}$	3.91	3.51	2.26	2.52	0.48	0.19	0.37	2.04	0.81	1.79	2.66	2.27	2.87	2.60

注： $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量；样品 ZK1607-242、ZK1609-416.4 数据引自文献[22]。

浓度线方程为

$$C_i^A = (M^O/M^A)(C_i^O + \Delta C_i) \quad (1)$$

式中： C_i^O 、 C_i^A 为原岩、交代岩中第 i 种元素的含量； M^O 、 M^A 分别为原岩和交代岩的质量； ΔC_i 为元素 i 在交代过程中含量的变化。

当元素 i 为不活动元素时，其在交代过程中迁移量很小，可近似为 0，因此， ΔC_i 近似为 0。式(1)可简化为

$$C_i^A = (M^O/M^A)C_i^O \quad (2)$$

式(2)在 C_i^A - C_i^O 图上表示斜率为 M^O/M^A 且穿过原点的直线，即等地球化学浓度线。令该直线的斜率为 k ，则

$$k = M^O/M^A = C_i^A/C_i^O \quad (3)$$

k 值可以粗略反映岩石发生交代蚀变过程中的体积变化。当 $k>1$ 时，体积亏损；当 $k<1$ 时， t 体积增大。将式(3)代入式(1)则可得到元素 i 的迁移量(i 为活动元素)

$$\Delta C_i = C_i^A/k - C_i^O \quad (4)$$

运用质量平衡方程至关重要的一点是要确定体系的不活动元素。 TiO_2 是交代蚀变过程中最保守的元素之一^[23-24]，将其作为不活动元素具有普遍意

义。本文选择 TiO_2 作为不活动元素，根据表 1 中数据得出 k 值为 0.380 8。其他元素在 C_i^A - C_i^O 图上的投点位于等地球化学浓度线之上的元素为带入元素，位于等地球化学浓度线之下的元素为带出元素(图 4)，同时运用式(4)也可以定量计算元素迁移量 ΔC_i (表 2)。 ΔC_i 大于 0 表明该元素有带入， ΔC_i 小于 0 表明该元素有带出。

从图 4 和表 2 中可知，主量元素中只有 Al_2O_3 、 Na_2O 和 K_2O 有少量带出，其他元素均有不同程度带入，其中 SiO_2 、 Fe_2O_3 和 CaO 带入量较大，1 g 矽卡岩化角岩在交代蚀变过程中， SiO_2 可带入 0.370 6 g， Fe_2O_3 可带入 0.403 8 g， CaO 可带入 0.707 g。稀土元素只有 Pr 和 La 有少量带出，其他稀土元素均为带入元素，带入量由大到小为：Nd、Ce、Gd、Dy、Er、Sm、Yb、Eu、Ho、Tb、Lu 和 Tm 带入量相同且带入量最小。微量元素中 Cu、Mo、Cr、W、V 带入量较大， 1.0×10^6 g 矽卡岩化角岩在交代蚀变过程中，Cu 可带入 937 g，Mo 可带入 516.98 g，Cr 可带入 175.49 g，W 可带入 1 021.81 g，V 可带入 222.11 g，As 可带入 96.16 g，Sn 可带入 67.27 g，Bi、Ni、Pb、Ga 带入量中等， 1.0×10^6 g 矽卡岩化角岩在交代

表 2 甲玛矿区矽卡岩化角岩中主量、微量和稀土元素向矽卡岩的迁移量

Tab. 2 Transfer Quantity of Major, Trace and Rare Earth Elements from Skarnization Hornfel to Skarn in Jiama Mining Area

元素或化合物	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
C _i ^A	36.04	4.59	17.15	0.91	1.94	31.61	0.13	0.10	0.24	0.46	0.22
C _i ^O	57.60	14.64	4.66	1.01	1.53	12.32	1.78	2.93	0.63	0.23	0.13
ΔC _i	37.06	-2.57	40.38	1.39	3.57	70.70	-1.44	-2.67	0.00	0.97	0.46
元素或化合物	As	Sb	Sn	Ag	Bi	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cs
C _i ^A	44.07	1.26	28.16	0.74	13.22	16.36	1.24	0.88	6.13	91.60	6.52
C _i ^O	19.57	3.69	6.68	0.50	14.13	156.27	8.10	0.52	11.34	65.05	16.37
ΔC _i	96.16	-0.38	67.27	1.44	20.59	-113.30	-4.84	1.79	4.75	175.49	0.74
元素或化合物	Cu	Ga	Hf	Li	Mo	Nb	Ni	Pb	Rb	Sc	Sr
C _i ^A	489.58	11.31	0.65	5.16	231.33	2.99	27.16	24.33	6.88	7.67	20.59
C _i ^O	349.03	15.48	4.13	15.79	90.50	12.24	32.63	18.40	173.46	14.69	85.57
ΔC _i	937.00	14.21	-2.41	-2.24	516.98	-4.39	38.69	45.50	-155.38	5.45	-31.49
元素或化合物	Ta	Th	Tl	U	V	W	Zn	Zr	Ce	Dy	Er
C _i ^A	0.20	3.10	0.19	9.03	119.60	410.47	49.67	56.88	23.58	3.15	2.01
C _i ^O	0.96	14.57	1.28	5.31	91.97	56.10	50.88	184.57	57.58	4.61	2.77
ΔC _i	-0.44	-6.44	-0.78	18.39	222.11	1 021.81	79.55	-35.22	4.33	3.67	2.51
元素或化合物	Eu	Gd	Ho	La	Lu	Nd	Pr	Sm	Tb	Tm	Yb
C _i ^A	0.86	3.66	0.60	9.12	0.24	15.32	2.25	2.98	0.47	0.24	1.79
C _i ^O	1.15	5.54	0.91	27.05	0.38	29.66	6.59	5.57	0.78	0.37	2.60
ΔC _i	1.11	4.08	0.67	-3.09	0.25	10.56	-0.67	2.27	0.46	0.25	2.09

蚀变过程中,Bi 可带入 20.59 g, Ni 可带入 38.69 g, Pb 可带入 45.5 g, Ga 可带入 14.21 g,其他微量元素带入量较小。Rb、Ba、Ta、Tl、Zr、Nb、Li、Hf、Be、Sb、Sr、Th 有带出,带出量由大到小为:Rb、Ba、Zr、Sr、Th、Be、Nb、Hf、Li、Tl、Ta、Sb。

4 元素活动性

凌其聪等根据质量平衡方程 $(C_i^O - C_i^A)/C_i^O = \mu(C_i^A/C_i^O) - \mu_i$ (μ 为系统质量变化, μ_i 为活动元素*i*的质量变化率)^[6],提出在 $(C_i^O - C_i^A)/C_i^O - C_i^A/C_i^O$ 图解上可以判别元素的活动性及活动序列。若 μ 值恒定,则元素在图上沿斜率为 1 的直线排列,位于左上端的元素为迁出元素,位置愈靠上端,其迁出的趋势愈强;位于右下端的元素为带入元素,位置愈靠下端,其带入的趋势愈强。对常量元素、稀土元素和部分微量元素进行判别(图 5)。从图 5 可以看出,主量元素 Al₂O₃、Na₂O 和 K₂O 带出序列由强至弱依次为 K₂O、Na₂O、Al₂O₃,其余均为带入元素,其带入序列的趋势由强至弱依次为 Fe₂O₃、CaO、MnO、P₂O₅、MgO、FeO、SiO₂[图 5(a)]。稀土元素中,Pr 和 La 为带出元素,其他均为带入元素,其带入序列

趋势由强至弱依次为 Eu、Er、Yb、Dy、Ho、Gd、Tm、Lu、Tb、Sm、Nd、Ce[图 5(b)]。微量元素中,Rb、Ta、Zr、Nb、Li、Be、Ba、Th、Sr 为带出元素,其带出序列由强至弱依次为 Rb、Ba、Be、Ta、Th、Sr、Nb、Zr、Li,其中带入元素序列由强至弱依次为 W、Sn、As、U、Cd、V、Ni、Ga、Co、Sc、Cs[图 5(c)]。成矿元素中,Ag、Cu、Mo、Pb、Zn 均为带入元素,带入序列由强至弱依次为 Mo、Ag、Cu、Pb、Zn[图 5(d)]。

5 元素质量迁移特征

矽卡岩化角岩被交代蚀变成矽卡岩过程中,各元素迁移量变化显示,元素在迁移过程中表现出了一定规律(表 2)。

在角岩矽卡岩化过程中,元素迁移特征表现为:只有少数元素被带出,包括亲石元素、亲石分散稀碱元素和亲氧元素,其中 K、Na、Li、Be 带出量较少,K 主要分散在造岩矿物中,在交代过程中与稀有元素和挥发分呈络合物形式迁移;Na 主要富集在含长石较多的岩石中,在岩浆作用过程中,Na 可以与稀有元素组成络合物 Na₂(NbF₇)、Na₂(TaF₇)等进行迁移^[25];黑云母是浓集与携带 Li 的主要矿物,Li 含量

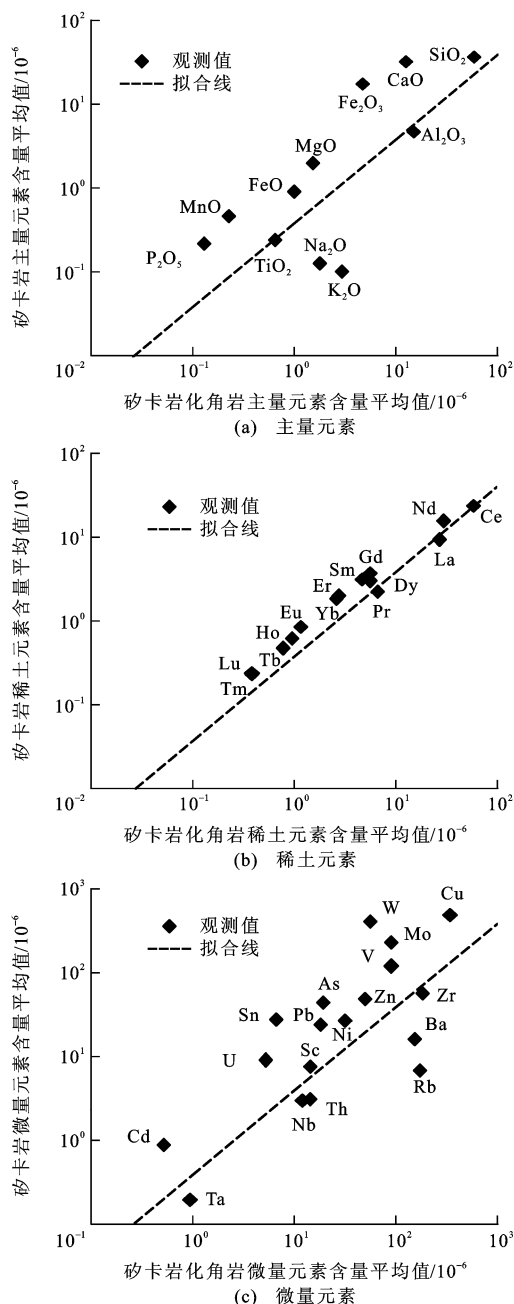


图 4 甲玛矿区矽卡岩化角岩与矽卡岩的等浓度图解

Fig. 4 Isocon Diagrams of Skarn and Skarnization
Hornfel in Jiama Mining Area

与挥发分密切相关;Be 可以在挥发分(F、Cl、OH、CO₂)含量增加的条件下与 K、Na 元素形成络合物 K₂(BeF₄)、Na₂(BeF₄)、K₂(BeCO₃)₂ 等进行迁移;Zr 带出量中等,自然化合物中的 Zr 经常与 Hf、Ti、Nb、Ta、Th 等元素进行类质同象置换,当岩浆中富碱及 H₂O、F、Cl 等挥发分时,Zr 呈络合物 [ZrO₄]⁴⁻、Na₂[Zr(CO₃)₃]等形式存在于碱性溶液中^[25]。由于 K、Na、Li、Be、Zr 均被带出,所以蚀变过程中 K、Na、Li、Be、Zr 以络合物形式存在于热液

中,进而推测热液中含有 F、Cl、OH、CO₂ 等挥发分。带出元素中,Ba 和 Rb 的带出量最大,1.0×10⁶ g 矽卡岩化角岩在交代蚀变过程中可带出 155.3 g 的 Rb 和 113.3 g 的 Ba。Rb 常在云母、长石等含钾矿物中产生类质同象;同样,Ba 也较多的与钾产生类质同象,Ba 在含钾的黑云母及基质中含量最高,因此,含有钾的热水溶液可以从围岩中提取 Ba,使其富集到溶液中^[25]。甲玛矽卡岩化角岩的矿物成分主要为石英、长石,并且发育黑云母,而矽卡岩中的主要矿物是石榴子石和硅灰石,这与表 2 显示的带出元素相吻合。

从表 2 可知,多数元素为迁入元素,这些元素在甲玛矽卡岩中表现出富集的特征。其中,Cu、Mo、Cr、W、V 迁入量大,Pb、Zn 迁入量中等。Cu、Mo、Pb、Zn 是主要的成矿元素,均具有强烈的亲硫性,在自然界主要以硫化物形式存在。热液中 Cu 的迁移方式主要呈氯的络合物及硫氢络合物等形式(如 [Cu(HS)₃]⁻、[CuCl₃]²⁻ 等),热液迁移过程中条件发生变化,络合物分解而产生 Cu 沉淀^[25]。甲玛铜多金属矿床主要以黄铜矿、斑铜矿为主,因此,成矿溶液中富硫、富铁有利于铜矿的富集;由于硫、铁以低价态出现,推测成矿溶液中贫氧。热液作用是 Pb、Zn 的重要析出阶段,Pb、Zn 的氯化物络合物是其在溶液中的主要搬运方式,当温度变化时,pH 值发生变化。当硫浓度增加时,Pb、Zn 发生沉淀形成方铅矿和闪锌矿^[25]。Mo 能以卤化物 (MoF₆、MoCl₂ 等)形式迁移,在硫逸度较高的介质中可形成少量辉钼矿^[25]。由于成矿元素 Cu、Mo、Pb 在矽卡岩中的含量高于在矽卡岩化角岩中的含量,推测蚀变热液也提供 Cu、Mo、Pb。内生矿物中,V、Cr 一般呈三价,三价的 V 作为类质同象的杂质存在于铁及部分铝的矿物中,而三价 Cr 的化合物和相应铁的化合物相似,Cr 几乎不进入钾长石和石英晶格^[25]。W 的带出量最大,1.0×10⁶ g 矽卡岩化角岩在交代蚀变过程中可带出 1 021.81 g 的 W,而且 W 具有形成各种卤化物和络合物的强烈倾向。甲玛矿床中 W 主要形成白钨矿,而且赋存于矽卡岩中,常与钙铁榴石、硅灰石和透辉石等矽卡岩矿物共/伴生^[26]。W 的大量沉淀基本发生在成矿介质温度降低、pH 值增高、氧硫逸度增高、氟降低的条件下^[25]。

综上所述,K、Na、Li、Be、Zr 等元素与 F、Cl、OH、CO₂ 形成络合物被带入溶液中。Cu、Mo、Pb 等元素也以络合物形式存在于蚀变流体中,溶液在迁移过程中当温度与 pH 值发生变化且硫逸度增加

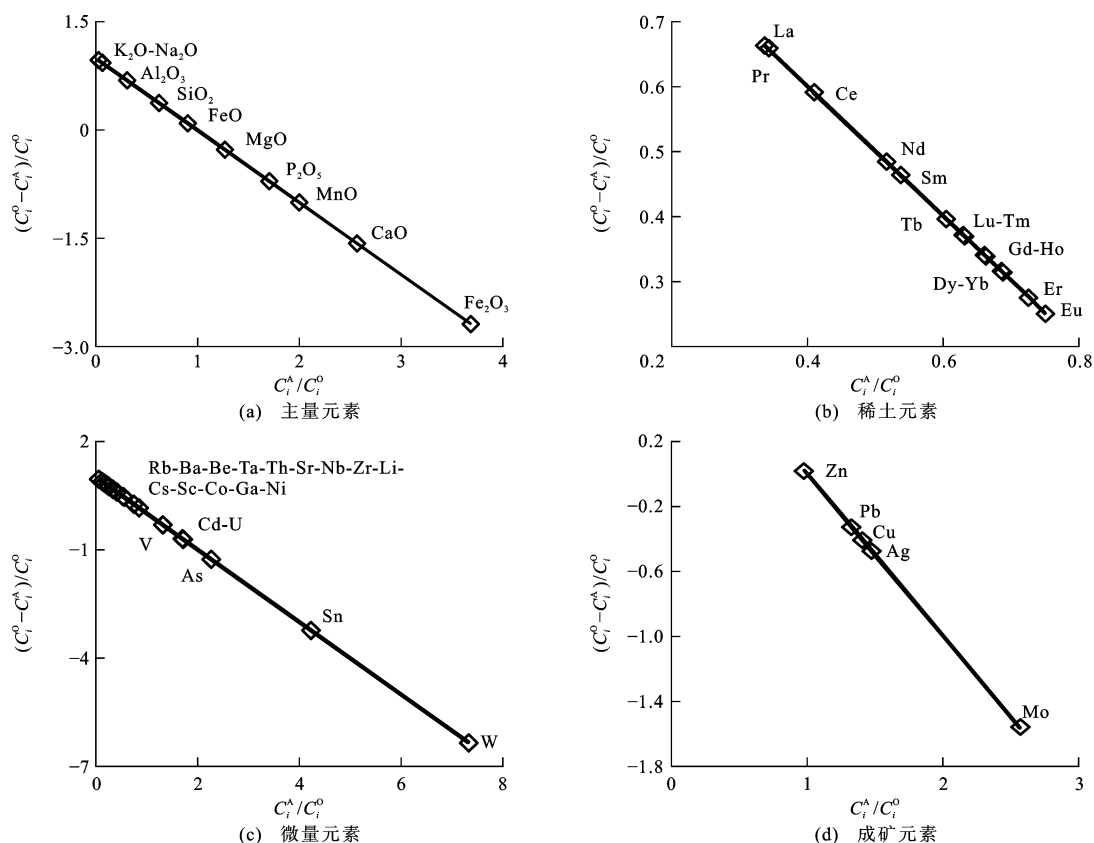


图 5 甲玛矿区矽卡岩化角岩在交代过程中元素活动序列图解

Fig. 5 Diagrams of Activity Sequence of Elements During Replacement of Skarnization Hornfel in Jiama Mining Area

时,络合物发生分解而使上述元素沉淀。溶液中富铁有利于黄铜矿、斑铜矿形成,因此,推测溶液中富含硫和铁且贫氧。利用元素的带入带出,导出蚀变矿物中元素的富集特征,从而可以将这些元素应用到找矿预测中(如黑云母、绢云母富集 Li,可以利用 Li 元素来指示蚀变分带和矿化分带;深部绿泥石富镁,浅部的富铁)。

6 结 语

(1)主量元素只有 Al_2O_3 、 Na_2O 和 K_2O 有少量带出, SiO_2 、 Fe_2O_3 和 CaO 带入量较大,其他主量元素有不同程度带入,带入序列的趋势由强至弱依次为 Fe_2O_3 、 CaO 、 MnO 、 P_2O_5 、 MgO 、 FeO 、 SiO_2 。

(2)微量元素中,Cu、Mo、Cr、W、V 带入量较大;Rb、Ba、Ta、Tl、Zr、Nb、Li、Hf、Be、Sb、Sr、Th 有带出,带出量由大至小依次为 Rb、Ba、Zr、Sr、Th、Be、Nb、Hf、Li、Tl、Ta、Sb。稀土元素的迁移行为具有一定规律性,其中 Pr 和 La 有少量带出,其他元素都为带入元素,带入序列的趋势由强至弱依次为 Eu、Er、Yb、Dy、Ho、Gd、Tm、Lu、Tb、Sm、Nd、Ce。成矿元素 Ag、Cu、Mo、Pb、Zn 为带入元素,其中 Cu

和 Mo 带入量较大, 1.0×10^6 g 矽卡岩化角岩在交代蚀变过程中可带入 937 g 的 Cu,可带入 516.98 g 的 Mo,带入序列由强至弱依次为 Mo、Ag、Cu、Pb、Zn。

(3)蚀变过程元素 K、Na、Li、Be、Zr 被带出与 F、Cl、OH、 CO_2 等组成络合物存在于溶液中。带入元素 Cu、Mo、Pb、Zn 在甲玛矽卡岩中表现出富集的特征,以硫化物形式存在。溶液中 Cu、Mo、Pb、Zn 以氯化物络合物形式搬运,当温度与 pH 值发生变化且硫浓度增加时,Cu、Mo、Pb、Zn 发生沉淀形成相应的硫化物。这些硫化物中硫、铁为低价态,而贫氧的流体有利于硫、铁以低价态出现。由于成矿元素 Cu、Mo、Pb 在矽卡岩中的含量高于在矽卡岩化角岩中的含量,所以推测蚀变热液也提供 Cu、Mo、Pb。根据研究结果,推断蚀变流体富集 F、Cl、OH、 CO_2 ,具有富含硫和铁元素且贫氧的特征。

西藏华泰龙矿业开发有限公司提供了野外工作支持,王勤硕士研究生在论文写作过程中给予了帮助,在此一并谢忱。

参考文献:

References:

[1] 艾金彪,马生明,樊连杰.内蒙古乌努格吐山斑岩型铜

- 钼矿床元素迁移定量探讨[J]. 地球学报, 2013, 34(2):193-202.
- AI Jin-biao, MA Sheng-ming, FAN Lian-jie. A Quantitative Discussion on Element Mass Migration in the Wunugetushan Porphyry Cu-Mo Deposit, Inner Mongolia [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(2):193-202.
- [2] 张亚辉, 张世涛. 云南文山官房钨矿床化学元素迁移与钨矿化的关系[J]. 矿物学报, 2011, 33(增):923-924.
- ZHANG Ya-hui, ZHANG Shi-tao. Relationship Between Elements Migration and Tungsten Mineralization of Guanfang Tungsten Deposit in Wenshan of Yunnan[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, 33(S):923-924.
- [3] 李 培, 邓小虎, 陈守余. 个旧蚀变岩型铜多金属矿床围岩蚀变过程中元素迁移定量研究[J]. 地质找矿论丛, 2011, 26(2):176-181.
- LI Pei, DENG Xiao-hu, CHEN Shou-yu. Quantitative Study of Elements Migration During the Wall-rock Alteration on Gejiu Altered Rock-type Copper-polymetallic Deposit [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2011, 26(2):176-181.
- [4] 姚晓峰, 王 友, 畅哲生, 等. 西藏甲玛铜多金属矿矽卡岩特征及成因意义[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2011, 38(6):662-670.
- YAO Xiao-feng, WANG You, CHANG Zhe-sheng, et al. Characteristics and the Genesis Implication of Skarn in the Jiama Copper-polymetallic Deposit, Tibet, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2011, 38(6):662-670.
- [5] 王登红, 唐菊兴, 应立娟, 等. 西藏甲玛矿区角闪岩特征及其对深部找矿的意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(7):2103-2108.
- WANG Deng-hong, TANG Ju-xing, YING Li-juan, et al. Hornfels Feature in the Jiama Ore Deposit, Tibet and Its Significance on Deep Prospecting[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(7):2103-2108.
- [6] 凌其聪, 刘丛强. 层控矽卡岩型矿床成矿系统的元素活动性及质量迁移——以铜陵冬瓜山铜矿床为例[J]. 矿物学报, 2003, 23(1):37-44.
- LING Qi-cong, LIU Cong-qiang. Mass Transfer and Element Mobility of Ore-forming System of Stratabound Skarn Type Deposits—A Case Study on the Dongguashan Strata-bound Skarn Copper Deposit in Tongling, Anhui Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2003, 23(1):37-44.
- [7] 袁兆宪, 成秋明, 姚凌青. 元素富集指数在研究矽卡岩化过程中元素迁移的应用[J]. 矿物学报, 2013, 35(增2):575.
- YUAN Zhao-xian, CHENG Qiu-ming, YAO Ling-qing. Application of Element Enrichment Index at Element Migration During Skarnization[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2013, 35(S2):575.
- [8] 张成华, 纪国栋. 川西地区钨矿地质特征及找矿方向[J]. 地质与勘探, 1983(9):15-20.
- ZHANG Cheng-hua, JI Guo-dong. Geological Features and Prospecting Direction of Tungsten Deposit in Western Sichuan[J]. Geology and Prospecting, 1983(9):15-20.
- [9] 陈婉君, 杨智荣. 广东大顶铁矿田多金属矿床地质特征及成矿规律[J]. 科技创新导报, 2008(29):98-99.
- CHEN Wan-jun, YANG Zhi-rong. Geological Features and Mineralization Law of Polymetallic Deposit in Dading Iron Orefield of Guangdong[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2008(29):98-99.
- [10] 郭文铂, 唐菊兴, 郑文宝, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床矽卡岩形成及矿化过程中的元素地球化学行为[J]. 地质与勘探, 2014, 50(3):397-410.
- GUO Wen-bo, TANG Ju-xing, ZHENG Wen-bao, et al. Geochemical Behavior of Elements During Formation and Mineralization Processes of Skarn in the Jiama Copper Polymetallic Deposit of Tibet[J]. Geology and Exploration, 2014, 50(3):397-410.
- [11] 郭文铂, 郑文宝, 唐菊兴, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床流体、成矿物质来源的地球化学约束[J]. 中国地质, 2014, 41(2):510-528.
- GUO Wen-bo, ZHENG Wen-bao, TANG Ju-xing, et al. Geochemical Constraints on the Source of Metallogenic Fluids and Materials in the Jiama Polymetallic Cu Deposit, Tibet [J]. Geology in China, 2014, 41(2):510-528.
- [12] 唐菊兴, 郑文宝, 陈毓川, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床深部斑岩矿体找矿突破及其意义[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2013, 43(4):1100-1110.
- TANG Ju-xing, ZHENG Wen-bao, CHEN Yu-chuan, et al. Prospecting Breakthrough of the Deep Porphyry Ore Body and Its Significance in Jiama Copper Polymetallic Deposit, Tibet, China[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2013, 43(4):1100-1110.
- [13] 张 志, 唐菊兴, 郑文宝, 等. 西藏甲玛铜多金属矿富矿体特征[J]. 地质与勘探, 2013, 49(1):9-18.
- ZHANG Zhi, TANG Ju-xing, ZHENG Wen-bao, et al. Geological Features of the Ore Shoots from the Jiama Copper-polymetallic Deposit in Tibet[J]. Geology and

- Exploration, 2013, 49(1): 9-18.
- [14] 应立娟, 郑文宝, 王崴平, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床同位素地球化学研究[J]. 地球学报, 2012, 33(4): 519-527.
- YING Li-juan, ZHENG Wen-bao, WANG Wei-ping, et al. Stable Isotopes Geochemistry of the Jiama (Gyama) Copper Polymetallic Deposit in Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(4): 519-527.
- [15] 唐菊兴, 邓世林, 郑文宝, 等. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床勘查模型[J]. 矿床地质, 2011, 30(2): 179-196.
- TANG Ju-xing, DENG Shi-lin, ZHENG Wen-bao, et al. An Exploration Model for Jiama Copper Polymetallic Deposit in Maizhokunggar County, Tibet[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(2): 179-196.
- [16] 应立娟, 唐菊兴, 王登红, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床矽卡岩中辉钼矿铼-钨同位素定年及其成矿意义[J]. 岩矿测试, 2009, 28(3): 265-268.
- YING Li-juan, TANG Ju-xing, WANG Deng-hong, et al. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenite in Skarn from the Jiama Copper Polymetallic Deposit of Tibet and Its Metallogenic Significance[J]. Rock and Mineral Analysis, 2009, 28(3): 265-268.
- [17] 郑文宝, 黎枫信, 唐菊兴, 等. 基于 Micromine 软件下地质统计学在甲玛矽卡岩型铜多金属矿储量计算中的应用[J]. 地质与勘探, 2011, 47(4): 726-736.
- ZHENG Wen-bao, LI Feng-xin, TANG Ju-xing, et al. The Application of Geostatistics to Ore Reserve Calculation of the Jiama Skarn Type Copper-polymetallic Deposit Based on Micromine Software[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(4): 726-736.
- [18] 林 彬, 唐菊兴, 张 志, 等. 西藏甲玛斑岩矿床裂隙系统的初步研究及意义[J]. 矿床地质, 2012, 31(3): 579-589.
- LIN Bin, TANG Ju-xing, ZHANG Zhi, et al. Preliminary Study of Fissure System in Jiama Porphyry Deposit of Tibet and Its Significance[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(3): 579-589.
- [19] 王崴平, 唐菊兴. 西藏甲玛铜多金属矿床角闪岩岩石类型、成因意义及隐伏斑岩体定位预测[J]. 矿床地质, 2011, 30(6): 1017-1038.
- WANG Wei-ping, TANG Ju-xing. Rock Types and Genetic Significance of Hornfels and Location Prediction of Concealed Porphyry Bodies in Jiama Copper Polymetallic Deposit, Tibet[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(6): 1017-1038.
- [20] 解庆林, 马东升, 刘英俊. 蚀变岩中物质迁移的定量计算——以锡矿山锑矿床为例[J]. 地质论评, 1997, 43(1): 106-112.
- XIE Qing-lin, MA Dong-sheng, LIU Ying-jun. Calculation of Mass Transfer in Altered Rocks—A Case Study of the Xikuangshan Antimony Deposit[J]. Geological Review, 1997, 43(1): 106-112.
- [21] GRANT J A. The Isocon Diagram—A Simple Solution to Gresens' Equation for Metasomatic Alteration[J]. Economic Geology, 1986, 81(8): 1976-1982.
- [22] 应立娟, 唐菊兴, 王登红, 等. 西藏甲玛超大型铜矿石榴子石特征及成因意义[J]. 地质学报, 2012, 86(11): 1735-1747.
- YING Li-juan, TANG Ju-xing, WANG Deng-hong, et al. Features of Garnet in the Jiama Super-large Cu Polymetallic Deposit and Its Genetic Significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(11): 1735-1747.
- [23] 周永章, 涂光炽, CHOWN E H, 等. 热液围岩蚀变过程中数学不变量的寻找及元素迁移的定量估计——以广东河台金矿田为例[J]. 科学通报, 1994, 39(11): 1026-1028.
- ZHOU Yong-zhang, TU Guang-chi, CHOWN E H, et al. Search for the Mathematical Invariants and Quantitative Estimates of Mass Transfer During the Hydrothermal Rock Alteration—A Case Study of Guangdong Hetai Gold Field[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(11): 1026-1028.
- [24] 邓海琳, 涂光炽, 李朝阳, 等. 地球化学开放系统的质量平衡: 1. 理论[J]. 矿物学报, 1999, 19(2): 121-131.
- DENG Hai-lin, TU Guang-chi, LI Zhao-yang, et al. Mass Balance of Open Geochemical Systems: 1. Theory[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1999, 19(2): 121-131.
- [25] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- LIU Ying-jun, CAO Li-ming, LI Zhao-lin, et al. Element Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [26] 应立娟, 王登红, 王 焕, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床中白钨矿的产出特征及其找矿意义[J]. 矿床地质, 2011, 30(2): 318-326.
- YING Li-juan, WANG Deng-hong, WANG Huan, et al. Occurrence Feature of Scheelite from Jiama Copper Polymetallic Deposit In Tibet and Its Ore-prospecting Significance[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(2): 318-326.