

文章编号:1000-4734(2003)01-0037-08

# 层控夕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

凌其聪<sup>1,2</sup>, 刘丛强<sup>1</sup>

(1.中国科学院 地球化学研究所 地球深部物质与流体地球化学作用实验室, 贵州 贵阳 550002;

2.中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**应用改善了的质量平衡方程研究冬瓜山层控夕卡岩型铜矿床成矿系统的元素活动性及质量迁移, 结果表明:系统中 Zr, Hf, Y 和 Nb 为不活动元素, 其余均为活动元素。主量元素中仅 CaO 为迁出组分, 其质量迁移量为 84%, 其余均为带入组分, 带入量最大的 SiO<sub>2</sub> 的质量迁移量高达 2384%; 稀土元素均为带入组分, 其中, 中稀土较轻稀土和重稀土的活动性更强; 其它微量元素中, 带入序列由强到弱为: Cr→Ta→Sn→Th, 迁出序列由强至弱依次为: U→Sb→Ni→Sr→Ba→Rb→Co→W; 成矿元素 Cu 和 Ag 为带入组分, 其中 Cu 的带入量最大, 质量迁移量高达 1200%。本文还得出两点具普适性认识: ①稀土元素较其它微量元素对体系条件的变化更为敏感, 且往往表现出明显的规律性变化, 能更好地追踪地质地球化学过程。②不同元素在不同体系中的行为特征差异极大, 仅凭经验判定某一元素为不活动元素往往不可靠。因此, 在开展质量平衡研究时, 首先采用适当方法确认体系的不活动元素是一项不可或缺的前提工作。

**关键词:**层控夕卡岩; 元素活动性; 质量平衡; 冬瓜山铜矿床

**中图分类号:** P588.31; P595 **文献标识码:** A

**作者简介:**凌其聪, 男, 1963 年生, 副教授, 从事地球化学、矿床学及矿物学的科研及教学工作。

层控夕卡岩型矿床是我国长江中下游地区尤其是铜陵聚矿区极具特色的一种矿床类型, 产出许多大型-超大型矿床, 有重要的经济价值。常印佛等<sup>[1,2]</sup>和 Pan 等<sup>[3]</sup>对该类矿床的基本地质特征进行了系统阐述。刘裕庆和刘兆廉<sup>[4]</sup>对冬瓜山矿床矿石及围岩的同位素特征作了较详细研究。凌其聪<sup>[5]</sup>以冬瓜山矿床为例, 综合分析了该类矿床的主要控矿因素和成矿规律, 并在系统研究成矿流体变化特征的基础上阐述该类矿床的成矿动力学机制。本文以该类矿床中兼具典型性和代表性的冬瓜山层控夕卡岩型铜矿床为对象, 运用质量平衡原理阐述成矿系统的元素活动性及质量迁移特征, 以期对成矿机制及成矿规律有更深入的了解。

## 1 地质特征

冬瓜山层控夕卡岩型铜矿床位于长江中下游多金属成矿带铜陵矿区, 是我国目前已发现的该类矿床中规模最大的一个, 其地质特征兼具典型性和代表性<sup>[1, 3-5]</sup>。夕卡岩及其相关矿体主要产于上石炭统黄龙组(C<sub>2h</sub>)碳酸盐中, 呈层状沿 C<sub>2h</sub> 地层分布, 产状与地层一致。夕卡岩体一端与侵入体接触或紧邻, 而另一端则远离岩体深入地层, 延长超过 3 000 m(图 1)。矿区内与成矿作用有关的岩浆岩主要为石英闪长岩。与这些燕山期侵入体有关的热变质作用和交代作用涉及的范围超过 20 km<sup>2</sup>。然而, 其它地区很常见的碳酸盐与侵入体接触带夕卡岩在此处却不发育。相反地, 顺 C<sub>2h</sub> 地层发育规模巨大的“层控夕卡岩”, 夕卡岩广泛矿化而形成层控夕卡岩型铜矿床。笔者通过对 12 个有代表性的地表探矿钻孔岩芯的详细观察, 发现该矿床内黄龙组(C<sub>2h</sub>)上部厚层大理岩

收稿日期: 2002-04-18

基金项目: 国家攀登预选项目(95-预-39); 国家杰出青年科学家基金项目(49625304); 自然科学基金重点项目(49633120)

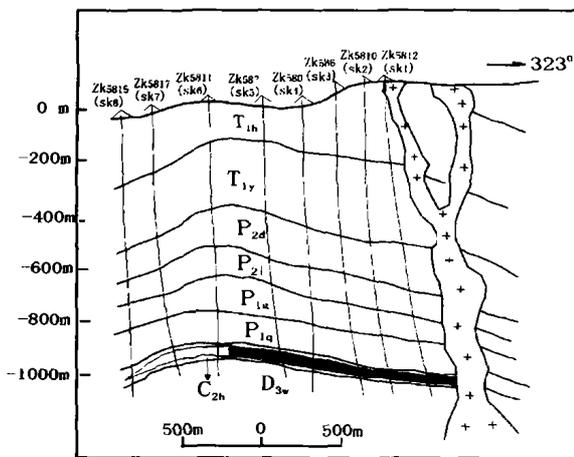


图1 冬瓜山矿床地质剖面简图及夕卡岩采样位置分布  
Fig. 1. Simplified geological cross-section map of the Dongguashan deposit and sample locations.

(由石灰岩经热变质而形成)并未完全夕卡岩化,可见到穿层方向上大理岩与夕卡岩之间呈渐变过渡关系,从块状夕卡岩向外,大理岩被交代的程度递减,表现在矿物组成上含石榴子石等夕卡岩矿物从内到外迅速减少。通过对岩芯手标本及其薄片的观察还发现,在顺层方向上垂深相当的夕卡岩(其原岩层位一致)显示出一定的变化规律:近岩体处夕卡岩的主矿物石榴子石颗粒粗大,含量很高,而远离岩体则变得细小,并且含量逐渐减少。此外,宏观上看似是一个独立的夕卡岩体,实际上是由于若干近于相互平行,似层状,厚度为5~15 m甚至更厚的次一级小夕卡岩体群构成的<sup>[6]</sup>。夕卡岩体主要由石榴子石夕卡岩组成,石榴子石含量一般达到85%以上,最高可达95%以上,其次为辉石(透辉石-次透辉石)及少量的石英、方解石、硫化物和极少量的磷灰石等副矿物<sup>[5]</sup>。

## 2 采样和分析方法

选定横贯矿区夕卡岩及矿体的勘探线,从探矿钻孔岩芯中取样。从近岩体到远离岩体分别采取垂向深度相近的夕卡岩样品。这样的采样方法基于对多个钻孔剖面的仔细观察后,确认它们的原岩层位及性质相同,以便作对比研究。

样品加工预处理选用手工操作完成。岩(矿)石样品的主量元素用湿化学法测定。稀土及微量元素用 ICP-MS 法测定,采用 HF + HNO<sub>3</sub> 密闭溶样,样品分析时外加国际标准样 AMH-1 和 OU-3

为标样作质量监控。REE 含量测试精度好于5%,其余微量元素的精度优于10%。主量元素、稀土及微量元素含量测定在中国科学院地球化学研究所矿床开放实验室完成,分析结果如表1所示。

## 3 质量平衡理论和方法

质量平衡方法已广泛用于研究各种地质体系中组分迁移和质量变化。Gresens<sup>[7]</sup>率先以实际岩石化学分析研究岩石质量平衡,并导出了著名的 Gresens 方程; Grant<sup>[8]</sup>对该方程进行了有效的简化,得到“等浓度方程”,为质量平衡研究提供了新的方法; Brimhall 和 Dietrich<sup>[9]</sup>、Brimhall<sup>[10]</sup>从简单直观的质量平衡出发,导出了以不活动元素为参考物种的质量变化和体积变化表达式; Maclean 和 Kranidiotis<sup>[11]</sup>、Ague<sup>[12]</sup>提出元素-元素图解判别交代过程中的不活动元素; O'Hara<sup>[13]</sup>提出以  $C_i/C_0 = 1/(1-V)$  表示岩石体积的亏损 ( $V$ )。上述各种方法提出后被广泛地应用于各种相关的研究中,对人们深入理解各种地质作用过程中岩石体系元素活动及质量迁移起到了很好的推动作用。邓海琳<sup>[14]</sup>发现这些方程或图解方法均存在某些问题或缺陷,并推导出新的质量平衡方程:

$$C_i^0 - C_i^A = \mu C_i^A - \Delta C_0^i \quad (1)$$

$$(C_i^0 - C_i^A)/C_i^0 = \mu (C_i^A/C_i^0) - \mu_i \quad (2)$$

式中  $C_i^0$ 、 $C_i^A$ 、 $\mu$  和  $\Delta C_0^i$  分别代表  $i$  组分的初始含量、终了含量、质量变化及质量变化率。

$$\mu = C_j^0/C_j^A - 1 \quad (j \text{ 为不活动元素}) \quad (3)$$

$$\mu_i = (C_j^0/C_j^A)(C_i^A/C_i^0) - 1 \quad (i \neq j) \quad (4)$$

据(3)式可计算岩石体系质量变化,从(4)式可计算出某一活动元素  $i$  的质量变化。

此外,邓海琳<sup>[14]</sup>也提出了应用  $C_i/C_j - C_i$ 、 $C_i^A/C_i^0 - C_j^A/C_j^0$  及  $C_i/C_j - C_k/C_j$  图解判别不活动元素的新方法,具体判别方法是:对各元素分析结果作相应的图解。当  $i, j$  为不活动元素时,在  $C_i/C_j - C_i$  (或  $C_i/C_j - C_j$ ) 图上形成一条通过原始组分点的一条直线,在  $C_i^A/C_i^0 - C_j^A/C_j^0$  图解上为通过原点且斜率为1的直线。 $i, j, k$  均为不活动元素时,在  $C_i/C_j - C_k/C_j$  图解上投点落入其投点必然落于图中一点或该点紧邻。新的图解法较好地克服了前人图解法中的不足,但要求系统存在两个以上的不活动元素的情形。从现有的研究实例来看,许多地质作用过程可以满足这一条件。

表 1 夕卡岩的主量元素、稀土元素和其它微量元素分析结果

Table 1. Data of major, rare earth and other trace elements for the skarns

	SK1	SK2	SK3	SK4	SK5	SK6	SK7	SK8	C <sub>2b</sub> (6)
<i>w</i> (主量元素)/%									
SiO <sub>2</sub>	39.86	41.78	40.69	44.64	42.94	40.39	40.28	43.15	0.43
TiO <sub>2</sub>	2.47	0.43	0.80	0.27	0.52	2.87	0.14	0.35	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.28	15.98	14.55	14.61	9.62	7.15	8.50	6.30	0.20
FeO <sub>i</sub>	5.48	8.80	7.55	8.26	14.33	13.65	15.02	14.74	0.68
MnO	0.24	0.48	0.20	0.59	0.34	0.18	0.12	0.22	0.05
MgO	2.29	2.65	2.33	3.34	2.95	3.28	0.67	4.94	0.33
CaO	32.54	28.98	32.57	27.39	28.68	31.08	34.86	29.79	54.78
Na <sub>2</sub> O	0.28	0.31	0.28	0.20	0.21	0.23	0.22	0.19	0.05
K <sub>2</sub> O	0.24	0.26	0.61	0.44	0.07	0.41	0.12	0.26	0.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.05	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01
CO <sub>2</sub>									43.23
总和	99.72	99.72	99.61	99.76	9.69	99.26	99.96	99.97	99.91
<i>w</i> (稀土元素)/10 <sup>-6</sup>									
La	23.82	27.43	33.41	26.23	24.35	25.64	21.39	22.55	1.25
Ce	38.40	54.74	56.49	51.36	48.80	47.83	48.03	43.41	2.12
Pr	4.34	6.71	5.08	6.15	6.39	5.05	5.64	4.94	0.18
Nd	33.32	22.17	15.32	22.92	23.14	19.72	22.39	18.3	0.56
Sm	8.61	5.68	2.47	4.25	4.51	3.81	4.72	3.60	0.13
Eu	1.58	0.97	0.46	0.68	1.01	0.67	0.91	0.62	0.04
Gd	9.68	4.38	3.69	3.65	3.68	3.98	3.90	2.81	0.15
Tb	1.50	0.62	0.66	0.49	0.41	0.63	0.57	0.38	0.04
Dy	8.16	3.32	4.97	2.63	2.14	3.85	3.09	1.99	0.23
Ho	1.64	0.63	1.19	0.51	1.00	0.86	0.60	0.40	0.05
Er	4.05	1.62	3.39	1.23	1.42	2.32	1.67	1.06	0.15
Tm	0.61	0.24	0.53	0.19	0.4	0.35	0.23	0.15	0.03
Yb	3.23	1.99	3.75	1.78	1.75	2.32	1.84	1.26	0.12
Lu	0.48	0.27	0.56	0.20	0.24	0.31	0.23	0.16	0.02
ΣREE	139.42	130.77	131.97	122.27	119.24	117.34	115.21	101.63	5.06
δEu	0.53	0.57	0.47	0.52	0.74	0.52	0.63	0.58	0.79
(La/Sm) <sub>N</sub>	1.74	3.04	8.51	3.88	3.40	4.23	2.85	3.94	6.05
(La/Yb) <sub>N</sub>	4.97	9.29	6.01	9.93	9.38	7.45	7.84	12.07	7.02
<i>w</i> (微量元素)/10 <sup>-6</sup>									
Cr	326.92	269.78	195.75	12.22	207.13	371.26	233.14	431.88	12.59
Co	13.03	29.17	5.34	1.10	2.69	35.11	34.46	19.47	4.82
Ni	17.99	11.63	8.58	6.79	6.91	16.58	11.77	12.81	13.15
Rb	25.05	80.09	15.3	3.35	57.76	127.36	426.43	119.83	9.61
Sr	67.65	1 175.45	54.88	288.77	97.31	702.75	231.50	883.95	43.22
Ba	44.65	1 182.97	29.41	12.02	161.09	681.54	296.81	1 483.15	20.24
Cu	2 200	1 300	1 200	800	600	300	300	100	17.54
Pb	37.09	130.45	20.59	3.05	15.23	17.21	10.05	17.13	12.55
Zn	163.7	141.07	53.09	4.96	48.77	50.65	66.91	30.67	37.88
Ag	9.13	2.32	0.47	0.21	0.61	2.13	3.88	0.58	0.05
Mo	209.43	4.16	42.97	0.94	13.78	5.11	83.65	19.56	1.24
Sn	10.34	5.42	8.33	1.80	66.23	5.85	6.85	6.00	1.68
Sb	2.6	9.14	1.89	0.43	0.62	1.38	0.56	1.27	2.43
Ta	0.81	1.04	0.5	0.03	0.65	0.82	0.91	0.93	0.12
W	53.07	1.95	24.65	1.31	24.65	10.84	32.43	9.21	16.83
Nb	5.72	16.51	7.66	0.28	10.38	12.95	15.65	15.59	2.06
Y	14.4	23.44	14.29	12.31	16.72	21.75	18.78	18.8	10.53
Zr	56.25	121.05	89.3	93.51	112.92	150.48	196.34	185.86	15.06
Hf	2.13	4.60	3.10	2.10	3.50	5.30	6.10	6.00	1.10
Th	5.52	9.90	4.80	0.20	5.60	9.90	10.80	7.60	1.30
U	4.21	2.60	3.60	3.30	6.24	3.06	4.66	2.42	9.42

注:  $w(\text{FeO}_i) = w(\text{Fe}_2\text{O}_3) + w(\text{FeO})$ ; 样品在中国科学院地球化学研究所测定, 稀土及微量元素测试者漆亮, 主量元素测试者李荪蓉。

### 4 冬瓜山矿床质量平衡研究的结果

利用表 1 的数据进行投点,结果表明 Zr, Hf, Y 和 Nb 为不活动元素(图略)。

#### 4.1 元素的活动性

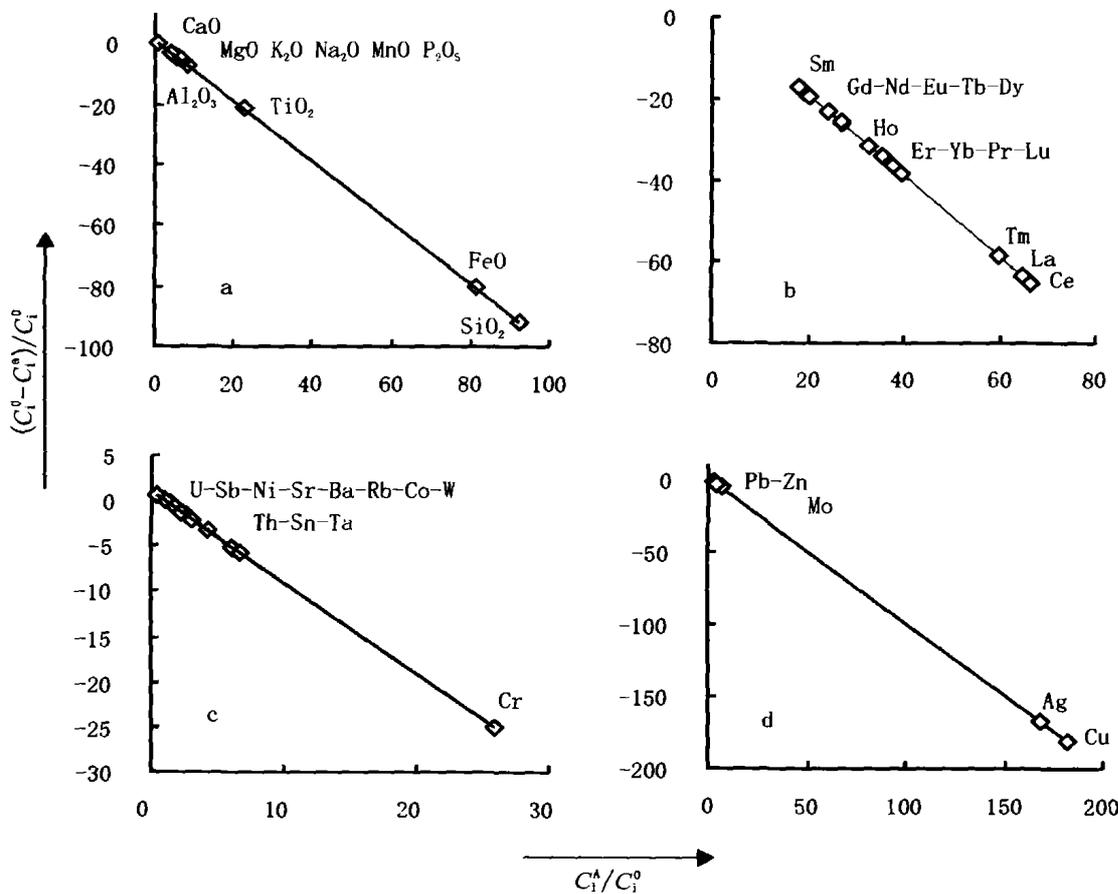
据公式(2)在  $(C_i^0 - C_i^A)/C_i^0 - C_i^A/C_i^0$  图解上很容易判别元素的活动性及活动序列:若系统的质量变化  $\mu$  值恒定,则元素在图解上沿斜率为 1 的直线排列。图解上以  $(C_i^0 - C_i^A)/C_i^0 = 0$  为界,位于左上端的元素为迁出元素,位置愈靠上端其迁出的趋势愈强;位于右下端的元素为带入元素,位置愈靠下端其带入的趋势愈强。本文以样品 SK1 为例,利用该图解方法对元素的活动性进行判别(图 2)。

主元素中仅有 CaO 为带出组分,其余均为带

入组分。带入序列由强至弱依次为:SiO<sub>2</sub>→FeO→TiO<sub>2</sub>→Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>→MgO→K<sub>2</sub>O→Na<sub>2</sub>O→MnO→P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(如图 2a 中所示)。

稀土元素均属带入系列。图 2b 显示,带入序列由强至弱依次为:Sm→Gd→Nd→Eu→Tb→Dy→Ho→Er→Yb→Lu→Tm→La→Ce,但在不同样品中有所不同。这反映了成矿系统的演化及不均一性和复杂性。

其它微量元素中,除 Zr, Hf, Y 和 Nb 为不活动元素外,其余元素均为活动元素。如图 2c 所示,带入序列由强至弱依次为:Cr→Ta→Sn→Th;迁出序列由强至弱依次为:U→Sb→Ni→Sr→Ba→Rb→Co→W。元素带入迁出的强弱排序在各样品之间有较大的差别,并且未表现出明显的空间变化规律。



a. 主量元素活动序列 b. 稀土元素活动序列 c. 微量元素活动序列 d. 成矿元素活动序列

图 2 夕卡岩形成过程中主量、稀土、微量和成矿元素活动序列图解

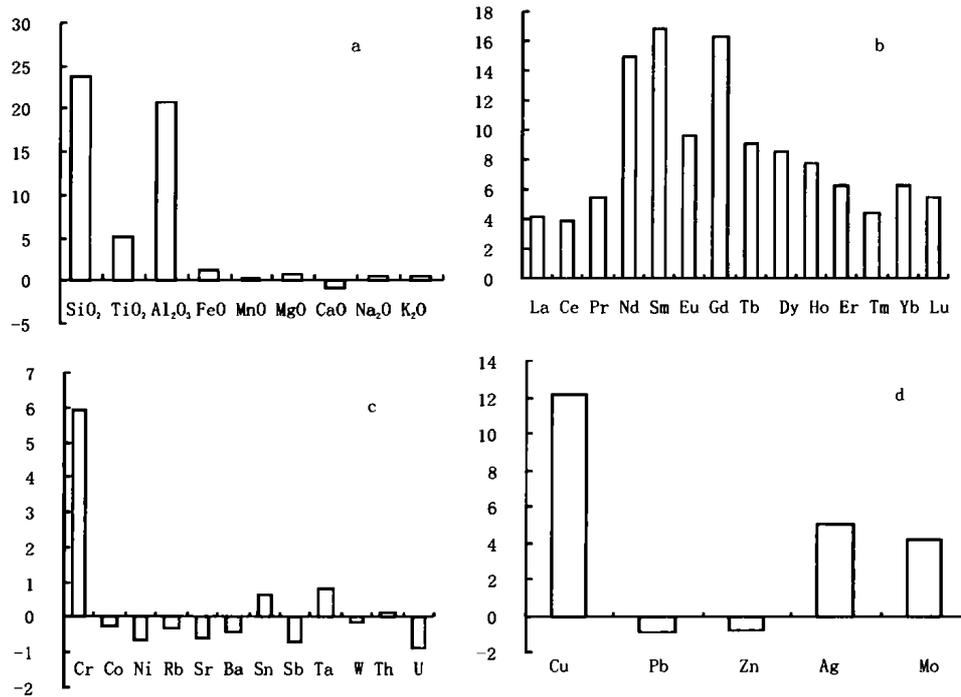
Fig.2. Mobilities of major elements (a), REEs (b), other trace elements (c) and ore-forming elements (d) during the formation of skarns.

成矿元素 Cu, Ag, Mo 均为带入元素。如图 2d 所示, 带入序列由强至弱依次为: Cu→Ag→Mo, 而 Pb、Zn 则表现为极轻微带出。

#### 4.2 成矿体系的质量迁移

如上所述, 在冬瓜山层控夕卡岩型矿床的形成过程中, Zr, Hf, Y 和 Nb 表现为不活动元素。以

其中任一元素为标准均可计算出成矿系统的质量迁移量。理论上, 以任一不活动元素计算的质量迁移结果应是完全一致的, 但实际地质过程系统极其复杂, 加之测试分析结果亦存在一定的误差等, 导致了以不同的元素为标准计算的结果有所差异。本文以 Zr 为标准计算系统组分质量的质量迁移量(图 3)。



a. 主要元素质量迁移 b. 稀土元素质量迁移 c. 微量元素质量迁移 d. 成矿元素的质量迁移

图 3 夕卡岩形成过程中主要元素、稀土元素、微量元素和成矿元素质量迁移图解

Fig. 3. Diagram of mass transfer for major elements (a), REEs (b), trace elements (c), and ore-forming elements (d) during the formation of skarns.

主要元素中只有 CaO 为迁出组分, 其迁出量为 84% (图 3a)。其余主要元素均为带入组分, 其中以 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的带入量最大, 分别达到 2384% 和 2082%。TiO<sub>2</sub> 和 FeO 亦较高分别为 502% 和 116%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 带入量相对较小, 为 7%, 其余元素带入量介于 29% 和 86% 之间。在带入的元素中, SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 FeO 的带入量在空间上从近岩体到远岩体没有明显变化, 但 TiO<sub>2</sub> 则显示从近岩体到远离岩体有降低的趋势。其它样品的带入和带出序列总体特征一致, 但带入或带出的量不尽相同。

稀土元素均为带入组分(图 3b), 但中稀土带入量要比轻稀土及重稀土高, 中稀土的带入量可高达 1675%, 而轻稀土和重稀土最高仅为 779%, 低者为 385%。当然, 各样品间亦有不同, 有些样

品, 轻中重稀土之间没有明显差异。

其它微量元素中(图 3c), Cr 强烈带入, 带入量达 596%, Ta、Sn 和 Th 有一定量的带入(分别为 81%, 66% 和 14%); 其余元素均为带出组分, 但带出量不大, 最高者 U 仅为 88%。不同样品中带入和带出组分不尽一致, 并且带出带入量亦有变化。

成矿元素中 Cu, Ag, Mo 大量带入, 带入量分别高达 1200%, 520% 和 480%, 而 Pb 和 Zn 则轻微带出(图 3d)。

## 5 讨论

以上运用质量平衡的方法研究了冬瓜山层控夕卡岩及铜矿床形成过程的元素活动和质量平衡, 揭示了成矿过程中体系的元素行为规律。主元素

均为活动元素,其中只有Ca为迁出元素,其余均为迁入组分。这与本区夕卡岩(主要是石榴石夕卡岩)是以Ca为主要组分的大理岩经热液交代作用而形成相吻合。在迁入量大的元素中, Si一方面与Al, Ca和Fe等组成夕卡岩的主矿物石榴子石(化学通式为:  $A_3B_2[SiO_4]_3$ , 其中  $A = Fe^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$ , 等  $B = Al^{3+}$ 、 $Fe^{3+}$ 、 $Cr^{3+}$ 、 $Ti^{4+}$  等);另一方面以石英颗粒的形式散布于主夕卡岩矿物之间。Al主要形成夕卡岩的主矿物。Fe则形成黄铁矿和参与形成主夕卡岩矿物。Ti小部分以类质同像形式进入主夕卡岩矿物的晶格,大部分形成副矿物钛铁矿。 $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 和FeO的带入围岩量在空间上从近岩体到远岩体没有明显变化,是由于这些组分为夕卡岩的主要成分,而交代作用所形成的夕卡岩在靠近与远离岩体处并没有太大差异。Ti主要以副矿物钛铁矿的形式存在,其含量的空间变化与夕卡岩中钛铁矿的含量变化相一致。

图4是以原岩标准化的REE分布型式图。夕卡岩的稀土总量与原岩相比显著升高,以原岩标准化的REE分布曲线均位于1之上,且稀土参数也变化明显;轻稀土/重稀土比值普遍升高,表1中原岩( $La/Yb$ )<sub>N</sub>值为7.02,夕卡岩为4.97~12.07;轻稀土/中稀土比值则普遍降低,表1中原岩( $La/Sm$ )<sub>N</sub>值为6.05,而夕卡岩为1.74至8.51;Eu异常则普遍地表现为更显著的负异常。通过热液交代作用形成的夕卡岩的REE含量较原岩显著升高,表明REE主要由热液带入,因此REE的变化反映了流体的REE特征。流体的REE应具有轻稀土/重稀土比值高,轻稀土/中稀土比值低,而Eu负异常很强烈的特征。

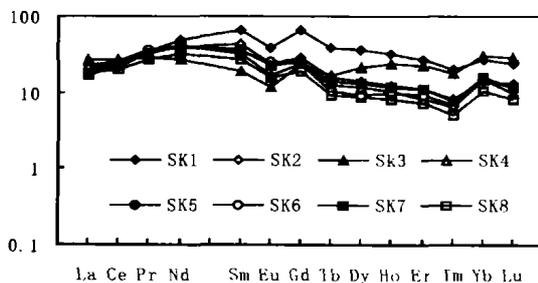


图4 夕卡岩以原岩稀土元素含量平均值标准化的REE分布型式图

Fig.4. Average protolith - normalized REE patterns of skarns in the Dongguashan deposit

稀土元素作为一组特殊的微量元素,在涉及水岩反应的地质过程中行为极其复杂,其中的轻、中和重稀土可能出现不同的活动性特征<sup>[15]</sup>。本区情况特殊,稀土元素均为活动元素,且均为带入组分。由于夕卡岩的稀土含量显著高于原岩,其稀土元素显然主要由参与交代作用的流体带入,因此它主要反映了流体中稀土的特征,而原岩中稀土元素的活动性的影响相对较小。相比之下,其它微量元素的变化则较为复杂,这一方面反映其在大理岩夕卡岩化过程中的行为较为复杂,同时亦可能表明原岩微量元素含量的不均一性。对比而言,稀土元素的行为规律更为明显。因此,在示踪地质作用过程方面比其它微量元素有更大的优越性。

成矿元素中Cu、Ag、Mo带入围岩量很大,Pb和Zn则表现为轻微带出,这与本区Cu、Ag矿化强,在一些层位(如二叠系的大隆组)出现Mo矿体和Pb、Zn基本不成矿的地质事实相吻合。因此,冬瓜山矿床的成矿元素Cu和Ag主要是由夕卡岩形成过程中参与交代作用的流体带来的。这一认识与前人<sup>[4]</sup>从稳定同位素研究得出Cu、Ag主要来自深源的结论相一致。

值得注意的是,一些通常被视为惰性的元素如Al、Th、Ti、V、P等在本区与成矿作用相关的热液交代作用的条件下表现出显著的活动性。在许多文献上,研究者主要凭经验判定不活动元素,并通常认为Th、V、Ti、Al和P等元素在热液蚀变过程中为惰性组分<sup>[13, 16-20]</sup>,更有作者<sup>[21]</sup>提出Ti、Al在矿床围岩发生热液蚀变过程中作为不活动元素具有普遍意义。这种认识和做法值得商榷。笔者认为,在研究地质系统的质量迁移问题时,首先采用适当方法找到不活动元素是一项不可或缺的前提工作,单凭经验判定某一元素为不活动元素往往不可靠。

## 6 结论

在冬瓜山层控夕卡岩型铜矿床形成的过程中,系统中Zr、Hf、Y和Nb为不活动元素,其余均为活动元素。主量元素中仅CaO为迁出组分,其质量迁移量为84%,其它主量元素均为带入组分,带入序列由强到弱为:  $SiO_2 \rightarrow FeO \rightarrow TiO_2 \rightarrow Al_2O_3 \rightarrow MgO \rightarrow K_2O \rightarrow Na_2O \rightarrow MnO \rightarrow P_2O_5$ 。其中带入围岩量最大的 $SiO_2$ 的质量迁移量高达2384%;稀土元素均为带入组分,带入序列由强到弱为:

Sm→Gd→Nd→Eu→Tb→Dy→Ho→Er→Yb→Lu→Tm→La→Ce, 中稀土较轻稀土和重稀土的活动性更强, 其质量迁移量达 1 675%。其它微量元素中, 带入序列由强到弱为: Cr→Ta→Sn→Th, 最大质量迁移量为 Cr 达 600%, 迁出序列由强至弱依次为: U→Sb→Ni→Sr→Ba→Rb→Co→W, 最大质量迁移量 U 为 98%; 主成矿元素 Cu 和 Ag 为带入组分, 其中 Cu 的带入量最大, 质量迁移量高达 1 200%。

本文还得出以下两点具普适性认识: ①在各种微量元素中稀土元素对体系条件的变化更为敏感, 且常表现出明显的规律性, 因此稀土元素较其它微量元素在示踪地质地球化学过程方面具有更大的优越性。②元素在不同地质体系中的行为特征差异极大, 单凭经验判定某一元素为不活动元素往往是不可靠的。在研究地质系统的质量迁移问题时, 首先采用适当方法找出不活动元素是一项不可或缺的前提工作。

#### 参考文献:

- [1] 常印佛, 刘湘培. 关于层控式夕卡岩型矿床[J]. 矿床地质, 1983, 2(1): 10~16.
- [2] 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1991. 1~52.
- [3] Pan Y and Dong P. The lower Changjiang (Yangtzi / Yangtze River) metallogenic belt, east central China: intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. *Ore Geol. Rev.* 1999, 15: 177~242.
- [4] 刘裕庆, 刘兆廉. 铜陵冬瓜山夕卡岩型矿床的稳定同位素研究[J]. 北京地质科学院矿床地质研究所刊, 1984, (1): 50~60.
- [5] 凌其聪. 层控夕卡岩型铜矿床的成矿作用动力学研究[D]. 武汉: 中国地质大学博士学位论文, 1999. 2~30.
- [6] Ling Q-C, Liu C-Q and Bao Z-Y. Analytical solutions for ore fluid transport in fractured rocks: A case study on ore-forming processes of the stratabound skarn copper deposits in China[J]. *IMA App. Math. J.*, 2001, 63(4): 108~128.
- [7] Gresens R L. Composition-volume relationships of metasomatism[J]. *Chem. Geol.* 1967, 2: 47~55.
- [8] Grant J A. The isocon diagram—A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration[J]. *Econ. Geol.*, 1986, 81: 1976~1982.
- [9] Brimhall G H and Dietrich W F. Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity and strain in metasomatic hydrothermal systems: Results on weathering and pedogenesis[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1987, 51: 566~587.
- [10] Brimhall G H. Metal enrichment in bauxites by deposition of chemically mature aeolian dust[J]. *Nature*, 1988, 333: 567~587.
- [11] Maclean W H and Kranidiotis P. Immobile elements as monitors of mass transfer in hydrothermal alteration: Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec[J]. *Econ. Geol.*, 1987, 82: 951~962.
- [12] Ague J J. Evidence for major mass transfer and volume strain during regional metamorphism of pelites[J]. *Geology*, 1991, 19: 855~858.
- [13] O'Hara K and Blackburn W H. Volume-loss model for trace element enrichments in mylonite[J]. *Geology*, 1989, 17: 524~527.
- [14] 邓海琳, 涂光炽, 李朝阳, 等. 地球化学开放系统的质量平衡: I 理论[J]. 矿物学报, 1999, 19(2): 121~131.
- [15] 凌其聪, 刘丛强. 水岩反应与稀土元素[J]. 矿物学报, 2001, 21(3): 45~55.
- [16] 杨新岳, 谢国源, 李志纯. 变形过程中的流体围岩作用和变形岩石质量平衡[J]. 中国科学(B辑), 1995, 25(3): 329~336.
- [17] O'Hara K. Fluid flow and volume loss during mylonitization: an origin for phyllonite in an overthrust setting, North Caralia USA [J]. *Tectonophysics*, 1988, 156: 21~36.
- [18] Zhong Z-Q and You Z-D. Fluid-rock interaction of shear zones in continental crust: as evidenced by Xincheng-Xishui and Hetai shear zones[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 1995, 2: 134~138.
- [19] Klammer D. Mass change during extreme acide-sulphate hydrothermal alteration of a Tertiary latite, Styria, Austria[J]. *Chem. Geol.*, 1997, 141: 33~48.
- [20] 高斌, 马东升, 刘连文. 围岩蚀变过程中地球化学组分质量迁移计算—以湖南沃溪金锑钨矿床为例[J]. 地质学报, 1999, 73(3): 272~277.
- [21] 魏俊浩, 刘丛强, 丁振举. 热液型金矿床围岩蚀变过程中元素迁移规律[J]. 矿物学报, 2000, 20(2): 200~206.

## 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

LING Qi-cong<sup>1,2</sup>, LIU Cong-qiang<sup>1</sup>

(1. *Laboratory for the Study of the Earth's Interior and Geofluids, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;*

2. *China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

**Abstract:** The element mobility and mass transfer of ore-forming system of the Dongguashan strata-bound skarn copper deposit have been studied by a newly improved mass balance method. It is demonstrated that Zr, Hf, Y and Nb show immobility and the other elements show mobile behavior during the formation of skarns. Among the major elements, Ca removed from the system comes up to 84%, while the others were incorporated into the skarns. All the rare earth elements were introduced into the system, among which MREE were more mobile than LREE and HREE. For other trace elements, the input amounts decrease gradually in the order of Cr→Ta→Sn→Th, and the output in the order of U→Sb→Ni→Sr→Ba→Rb→Co→W. Major ore-forming elements such as Cu and Ag were incorporated into the skarns, of which Cu put into the skarn comes up to 1 200%. Two general conclusions may be drawn as follows. Firstly, the REE are more sensitive to the variation of the formation condition of rock systems than other trace elements and generally show evident regularities. Consequently, the REE could be more useful for tracing the evolution history of the rock system than other trace elements. Secondly, element mobility is very different in various geochemical processes, and it is difficult to ascertain the immobile elements only by experiences. One has to find immobile elements with adequate methods before studying mass transfer of a geological system.

**Key words:** strata-bound skarn; element mobility; mass balance; Dongguashan copper deposit