安徽铜陵冬瓜山铜矿矽卡岩形成过程中元素质量迁移*

——与凌其聪等同行探讨

Immobile elements discrimination and mass balance calculation in the skarn-forming process of the Dongguashan copper deposit, Tongling area, Anhui Province: A comment on opinions held by Ling QiCong et al.

龚庆杰[1]，韩东昱[1]，刘宁强[2]

（1. 中国地质大学地球科学与资源学院，北京 100083；2. 中国地质大学地球科学学院，湖北 武汉 430074）

GONG QingJie[1], HAN DongYu[1] and LIU NingQiang[2]

(1 School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2 Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

摘 要 质量平衡法是研究岩石蚀变过程中元素迁移的有效方法之一，其关键环节是确定蚀变过程中的不活动元素。凌其聪和刘丛强（2003）《层控矽卡岩型矿床成矿系统的元素活动性及质量迁移——以铜陵冬瓜山铜矿为例》一文中认为在安徽铜陵冬瓜山铜矿矽卡岩形成过程中 Zr、Hf、Y、Nb 为不活动元素的结论欠妥，证据不足，从而导致提出采用不同不活动元素为标准计算的结果有所差异的错误认识。本文采用龚庆杰等（2006）提出的新改进方法对其岩石分析数据重新进行研究，结果表明安徽铜陵冬瓜山铜矿矽卡岩形成过程中 Zr、Th、P_2O_5 在系统中可视为不活动元素，由此确定的岩石质量迁移率为-0.7326，这与凌其聪和刘丛强（2003）一文中采用 Zr 的计算结果相一致。

关键词 质量平衡；不活动元素；冬瓜山铜矿；矽卡岩

http://www.kcdz.ac.cn/

在岩浆热液矿床周围通常形成明显的蚀变矿物和地球化学晕，即蚀变岩带，这些蚀变岩带比矿床本身大得多。因此，定量研究蚀变岩形成过程中元素质量迁移将对探讨矿床成因、指导找矿勘探具有重要意义。质量平衡法是 20 世纪 60 年代提出的用于研究开放系统中元素带入与带出的经典方法。邓海琳等（1999）曾对 20 世纪关于质量平衡法的主要研究成果进行分析比较，指出前人研究中存在的问题和不足，并提出了相应的改进方法。凌其聪和刘丛强（2003）利用邓海琳等（1999）的改进方法研究了安徽铜陵冬瓜山铜矿床矽卡岩形成过程中的元素活动性及质量迁移。龚庆杰等（2006）对近几年关于蚀变岩中元素质量迁移方面的研究成果进行分析，发现在蚀变岩质量平衡计算中目前常用的确定不活动元素的方法存在缺陷，并提出了新的改进方法。本文在指出凌其聪和刘丛强（2003）《层控矽卡岩型矿床成矿系统的元素活动性及质量迁移——以铜陵冬瓜山铜矿为例》一文（以下简称“凌文 2003”）中不足之处的基础上，采用龚庆杰等（2006）新的改进方法对其进行完善，并与凌其聪和刘丛强等同行进行探讨。

1 问题的提出

*本文得到国家自然科学基金项目（40373003，40234048）的资助
第一作者简介 龚庆杰，男，1972 年生，博士，副教授，地球化学专业。E-mail: qjiegong@cugb.edu.cn

在蚀变岩质量平衡计算中的一个关键问题是如何筛选出系统中的不活动元素。目前发表的文献中确定系统不活动元素的方法主要有两种：等浓度图解法和经验判断法。经验判断法确定系统中不活动元素大多是参考已进行过相似系统的等浓度图解法研究成果。“凌文 2003”采用图解法来确定系统中的不活动元素，但存在以下明显不足之处：

（1）确定系统中的不活动元素是蚀变岩质量平衡计算的关键，“凌文 2003”却仅用一句话“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）”来说明。最为关键的图在“凌文 2003”中却省略了，这是明显不足之处。此外，邓海琳等（1999）的改进方法仍存在不足，这也可能是导致“凌文 2003”未给出确定系统不活动元素图解的原因之一。由于缺少图解证据，因此对“Zr，Hf，Y 和 Nb 为不活动元素”的结果表示怀疑。

（2）既然“凌文 2003”研究“结果表明 Zr，Hf，Y 和 Nb 为不活动元素（图略）”，在进行质量平衡计算时应采用 Zr，Hf，Y 和 Nb 四元素的综合作用来确定体系的岩石质量迁移率。但“凌文 2003”指出“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迁移量”。既然“以不同的元素为标准计算的结果有所差异”，却仅采用 Zr 为标准而不采用四元素综合作用来计算系统组分质量的迁移量，这也是明显不足之处。此外，“以不同的元素为标准计算的结果有所差异”其差异究竟有多大、是否存在显著差异这些问题“凌文 2003”并未指出，本文作者认为以不同的（不活动）元素为标准计算的结果应基本上不存在差异，因此对“凌文 2003”的上述解释表示怀疑。

2 改进的方法

对“凌文 2003”中存在的上述两处明显不足，本文作者认为可能是由确定不活动元素不当所致。本文采用龚庆杰等（2006）新的改进方法来重新确定安徽铜陵冬瓜山铜矿矽卡岩形成过程中的不活动元素，并进行蚀变岩质量平衡计算探讨。

在“凌文 2003”中以中石炭统黄龙组灰岩（C_2h）作为原岩，以矽卡岩（样号：SK1）作为蚀变岩进行计算。本文仍选择这两组数据（表 1）来确定蚀变系统中的不活动元素，进而计算元素的质量迁移率 $\mu_i=M^A_i/M^O_i-1$，其中 M^O_i 和 M^A_i 分别代表蚀变前后元素 i 在灰岩和矽卡岩中的质量。

表 1 元素含量及其质量迁移率

元素	C_2h	SK1	μ_i	元素	C_2h	SK1	μ_i
Zr	15.06	56.25	**0.00**	La	1.25	23.82	4.1
Th	1.3	5.52	**0.14**	Ce	2.12	38.4	3.8
P_2O_5	0.01	0.04	**0.07**	Pr	0.18	4.34	5.4
MnO	0.05	0.24	**0.28**	Nd	0.56	33.32	14.9
Ta	0.12	0.81	0.80	Sm	0.13	8.61	16.7
Cr	12.59	326.92	5.94	Eu	0.04	1.58	9.6
TiO_2	0.11	2.47	5.00	Gd	0.15	9.68	16.3
Al_2O_3	0.2	16.28	20.77	Tb	0.04	1.5	9.0
Y	10.53	14.4	-0.63	Dy	0.23	8.16	8.5
Hf	1.1	2.13	-0.48	Ho	0.05	1.64	7.8
Nb	2.06	5.72	-0.26	Er	0.15	4.05	6.2
U	9.42	4.21	-0.88	Tm	0.03	0.61	4.4
Cu	17.54	2200	32.54	Yb	0.12	3.23	6.2
REE	5.07	139.42	6.35	Lu	0.02	0.48	5.4

注：黑体数字为不活动元素的质量迁移率。

http://www.kcdz.ac.cn/

依据龚庆杰等（2006）新的改进方法，首先排除碱金属、碱土金属、典型成矿元素等在蚀变过程中认为是活动的元素，选择 TiO_2、MnO、P_2O_5、Cr、Ta、Nb、Y、Zr、Hf、Th、U 共 11 种元素暂作为不活动元素（注：部分元素以氧化物形式表示，下同），选择 Al_2O_3 作为灰岩发生矽卡岩化过程中的活动元素。将从这 12 种元素中筛选出不活动元素。

其次选择矽卡岩样品（SK1）、灰岩样品（C_2h）及原点样品（各元素含量均为零）对上述 12 个元素进行相关分析，在显著性检验 r=0.997 水平上确定出不活动元素群和协变元素群如表 2 所示。

表 2　相关系数矩阵

	Zr	Th	P_2O_5	MnO	Ta	Cr	TiO_2	Al_2O_3	Y	Hf	Nb
Th	**0.999**										
P_2O_5	**1.000**	**1.000**									
MnO	**0.998**	**1.000**	**0.999**								
Ta	0.992	0.996	0.995	**0.998**							
Cr	0.974	0.981	0.978	0.986	0.995						
TiO_2	0.975	0.982	0.979	0.987	0.995	**1.000**					
Al_2O_3	0.969	0.977	0.973	0.982	0.992	**1.000**	**1.000**				
Y	0.866	0.849	0.857	0.833	0.798	0.731	0.735	0.715			
Hf	0.961	0.951	0.955	0.941	0.919	0.873	0.876	0.862	0.971		
Nb	0.995	0.991	0.993	0.986	0.975	0.946	0.948	0.938	0.913	0.984	
U	0.199	0.165	0.180	0.137	0.076	-0.027	-0.022	-0.050	0.662	0.463	0.298

注：黑体数字达到显著性相关水平（>0.997）。

从表 2 中可以看出，Zr、Th、P_2O_5、MnO 相互之间显著相关，MnO 和 Ta 显著相关，Cr、TiO_2、Al_2O_3 相互之间显著相关。由于 MnO 跨在两群之间故将其剔出，则仅剩下 Zr、Th、P_2O_5 相关群和 Cr、TiO_2、Al_2O_3 相关群，前者应该代表矽卡岩蚀变系统中的不活动元素，后者应该代表矽卡岩蚀变系统中的协变元素（由于将 Al_2O_3 视为活动元素）。

然后，对所选出的不活动元素群和协变元素群在等浓度图解中拟合过原点的直线，由直线斜率计算出蚀变系统的岩石质量迁移率 μ=斜率-1=M^A/M^O-1，其中 M^O 和 M^A 分别代表蚀变前后灰岩和矽卡岩的质量。结果如图 1 所示，图中同时给出不活动元素群和协变元素群的拟合直线。假设也将协变元素群作为不活动元素来计算蚀变前后岩石的质量迁移率，则依据 Cr、Al_2O_3、TiO_2 三者所计算的结果存在显著差异，因此可以认为假设是错误，从而验证了经验规律：Al_2O_3 是矽卡岩化过程中的活动元素。依据不活动元素群 Zr、

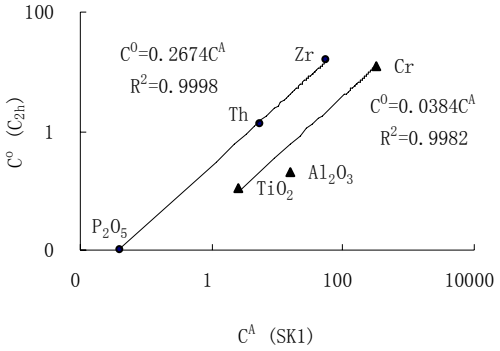

图 1　等浓度图解

C^O 代表灰岩（C2*h*）；C^A 代表夕卡岩（SK1）；圆点代表不活动元素群；三角代表协变元素群。

http://www.kcdz.ac.cn/

Th、P_2O_5 拟合获得灰岩发生矽卡岩化过程中岩石质量迁移率μ=0.2674-1=-0.7326。

最后，依据岩石质量迁移率μ=-0.7326 即可计算活动元素的质量迁移率$\mu_i=(1+\mu)C^A_i/C^O_i-1$，计算结果如表 1 所示。

3 结果的讨论

依据改进的方法对安徽铜陵冬瓜山铜矿矽卡岩形成过程中的元素质量迁移研究结果表明：

（1）矽卡岩化蚀变过程中的不活动元素是 Zr、Th、P_2O_5，其元素质量迁移率分别为 0.00，0.14 和 0.07。而 Hf、Y、Nb 的元素质量迁移率分别为-0.48，-0.63 和-0.26，均明显大于不活动元素的质量迁移率，因此应视为不活动元素。但相对于其它元素如 TiO_2、Al_2O_3、Cu、REE 而言，可将其视为弱活动元素。因此“凌文 2003”中认为 Zr、Hf、Y、Nb 为不活动元素的结论欠妥，证据不足。

（2）依据 Zr、Th、P_2O_5 的综合作用计算出的岩石质量迁移率μ=-0.7326。如果单独采用 Zr、Th、P_2O_5 来计算岩石质量迁移率μ，则分别为-0.7323、-0.7645 和-0.7500，其值均比较接近。因此可以认为以不同的不活动元素为标准计算的结果基本一致，这与理论相符合。而“凌文 2003”中“以不同的元素为标准计算的结果有所差异”的原因解释和结论欠妥。

（3）如果按照“凌文 2003”中将 Zr、Hf、Y、Nb 视为不活动元素来计算岩石质量迁移率μ，则分别为-0.7323、-0.4836、-0.2688 和-0.6399，自然得出“以不同的元素为标准计算的结果有所差异”的结论。由于“凌文 2003”中采用 Zr 作为不活动元素进行计算，与本文采用 Zr、Th、P_2O_5 的综合作用计算结果相一致，因此“凌文 2003”中关于主量元素、稀土元素、微量元素、成矿元素的质量迁移研究结果均是合理的。如本文计算的关于稀土元素的质量迁移率μ_i 如表 1 所示，其结果与“凌文 2003”中相一致，表明安徽铜陵冬瓜山铜矿区稀土元素在灰岩的矽卡岩化蚀变过程中是较强的活动元素，且均为显著带入组分，利用这一明显的规律性变化特征可以进行有效的地球化学示踪研究。

4 结 论

（1）在蚀变岩质量平衡计算中，确定系统中的不活动元素是关键环节，应用龚庆杰等（2006）提出的新改进方法来确定系统中不活动元素是合理可行的；而凌其聪和刘丛强（2003）一文中认为 Zr、Hf、Y、Nb 为不活动元素的结论欠妥，证据不足，导致提出采用不同不活动元素为标准计算的结果有所差异的错误认识。

（2）安徽铜陵冬瓜山铜矿矽卡岩形成过程中，Zr、Th、P_2O_5 在系统中可视为不活动元素，由此确定的岩石质量迁移率为-0.7326，与凌其聪和刘丛强（2003）一文中采用 Zr 的计算结果相一致。

http://www.kcdz.ac.cn

参 考 文 献

邓海琳, 涂光炽, 李朝阳, 等. 1999. 地球化学开放系统的质量平衡: 1. 理论. 矿物学报，19(2): 121~131.

龚庆杰, 韩东昱, 刘宁强, 等. 2006. 蚀变岩元素质量平衡计算中确定不活动元素方法的改进. 已投稿

凌其聪, 刘丛强. 2003. 层控矽卡岩型矿床成矿系统的元素活动性及质量迁移——以铜陵冬瓜山铜矿为例. 矿物学报，23(1): 37~44.

.