www.cagsbulletin.com www.地球学报.com

内蒙古乌努格吐山斑岩型铜钼矿床元素迁移定量探讨

艾金彪¹⁾,马生明^{1)*},樊连杰²⁾

1)中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,河北廊坊 065000;
 2)中国地质大学(北京),北京 100083

摘 要: 元素的富集贫化是矿床中固有的客观规律。在以往相关研究中,研究者们多从定性的角度对此进行 讨论,定量研究不够系统。本文以内蒙古乌努格吐山斑岩型铜钼矿床为例,利用 Grant 方程,定量探讨了该 矿床蚀变围岩中元素的带入、带出特征。结果表明,不同元素的质量迁移在矿化蚀变范围内表现出一定的规 律性,相对于原岩而言,各蚀变带中 Cu、Mo、Au、Ag、W、Sn、As、F、Hg、S 等表现为明显的带入特征, 而 CaO、Na₂O、TiO₂、Zr、Ba、Sr、Rb 和 REE 则表现为明显的带出特征。这些元素的带入带出导致矿床及 蚀变围岩中元素的富集贫化。元素质量迁移定量计算思路和方法,为地球化学勘查向定量化方向发展提供了 可行的途径。

关键词: 乌努格吐山; 矿化蚀变; 质量迁移; 富集贫化; 定量计算 中图分类号: P588.13; P595 文献标志码: A **doi**: 10.3975/cagsb.2013.02.06

A Quantitative Discussion on Element Mass Migration in the Wunugetushan Porphyry Cu-Mo Deposit, Inner Mongolia

AI Jin-biao¹⁾, MA Sheng-ming^{1)*}, FAN Lian-jie²⁾

 Institute of Geophysical and Geochemical Exploration , Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000;
 China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083

Abstract: Element enrichment and depletion constitute the inherent objective regularity in the ore deposits. Previous studies mainly concentrated on discussions from the qualitative angle, whereas quantitative researches were insufficient. This paper made a tentative quantitative discussion on characteristics of the gains and losses of elements during their migration, through calculation based on the formula given by Grant, with the Wunugetushan porphyry ore deposit as an example. The results demonstrate that mass migration of different elements show certain regularity within the range of mineralized alteration. Compared with least-altered rocks, altered rocks are obviously enriched in Cu, Mo, Au, Ag, W, Sn, As, F, Hg, S and depleted in CaO, Na₂O, TiO₂, Zr, Ba, Sr, Rb and REE. The gains and losses of elements caused the element enrichment and depletion of the ore deposit and altered wall rock. The calculation thinking and method for element mass migration provide an available approach to geochemical exploration in the quantitative direction.

Key words: Wunugetushan; mineralized alteration; mass migration; enrichment and depletion; quantitative estimation

成矿过程中围岩的矿化和蚀变实质上是元素的

迁移,也就是元素带入带出的结果。元素的带入带

本文由国土资源部公益性行业科研专项(编号: 201111008)资助。

收稿日期: 2012-06-25; 改回日期: 2012-08-15。责任编辑:魏乐军。

第一作者简介: 艾金彪, 男, 1987 年生。硕士研究生。主要从事地球化学专业研究。E-mail: aijb1987@163.com。

^{*}通讯作者:马生明,男,1963年生。博士,教授级高级工程师。主要从事矿产勘查地球化学方法技术研究。E-mail:msmigge@163.com。

出,导致矿床及其围岩中元素的富集贫化。已有研 究表明, 元素的富集、贫化是热液矿床中固有的客 观规律(马生明等, 2009; 弓秋丽等, 2009; 梁胜跃等, 2010)。综合利用矿床中由元素富集贫化形成的正异 常和负异常构成的地球化学异常结构模式,可以为 矿床地球化学勘查提供更可靠的信息(马生明等, 2011)。元素的富集贫化本质上是矿化蚀变过程中元 素质量迁移的结果,具有固有的内在规律性。以往 有关这方面的试验研究结果多以定性描述为主,不 过也有少数研究者进行过元素质量迁移的定量计算, 取得了一定经验并提出了一些方法,如 Helegson 利 用计算机程序发展了一种模拟热液流体与围岩之间 交换的定量方法, Gresens(1967)提出了岩石交代蚀 变的成分-体积关系法, Grant(1986)在 Gresens 定量 方程研究的基础上,提出另一种图解-等浓度线法, 这些方法在国内外都得到一定应用(Appleyard, 1980; Morton et al., 1984; 周永章等, 1994; 李双保, 1994; 张生等, 1997; 王祖伟等, 1998; 唐相伟等, 2010; 王 睿等, 2010)。结果表明, 采用合适的方法进行元素质 量迁移的定量计算是可行的。

内蒙古乌努格吐山矿床是一个大型斑岩型铜钼 矿床,前人对乌努格吐山矿床的研究工作包括矿床 的成因和成矿背景、成矿规律、围岩蚀变类型和机 理研究等(秦克章等, 1993; 宋国利等, 1985; 王之田 等, 1988; 王荣全等, 2007; 周忠政等, 2008), 都取 得了相应的认识和进展,特别是元素的富集贫化特 征已经得到证实(弓秋丽等,2009;梁胜跃等,2010)。 但到目前为止,从定量角度对乌努格吐山矿床各类 蚀变围岩中元素质量迁移的讨论还没有涉及。本文 选择 Grant 方程,利用实测分析数据,计算得出了乌 努格吐山矿床不同类型蚀变岩石在蚀变前后元素质 量的变化情况,并对由元素质量迁移导致的富集贫 化特征进行了探讨。试验结果不仅再次证实了乌努 格吐山矿床中元素富集贫化特征的存在,更重要的 是为探讨矿床中元素的富集贫化,也即迁移规律提 供了一个可行的思路和方法。

1 试验区地质概况及试验方法

1.1 地质概况

乌努格吐山斑岩型铜钼矿床位于额尔古纳褶皱 系海拉尔凹陷西侧的中生代火山盆地的古隆起区, 区域性 NE 向的得尔布干深断裂在矿区东侧 40 km 处。矿床产于哈尼沟 NW 向次级断裂旁侧, 地层较 为复杂, 主要有上古生界下石炭统莫尔根河组海相 火山岩地层, 中生界上侏罗统陆相中酸性火山岩沉 积岩层。容矿岩性为中酸性、酸性火山-次火山杂岩 体,组成较为完整且形态复杂的火山机构,区域上 主要有两期构造岩浆活动。燕山早期首先是安山质 岩浆的大面积喷发,形成二长花岗斑岩、流纹斑岩 和流纹质凝灰质熔岩,之后是黑云母花岗岩浆的侵 入(图 1)。

成矿岩体由二长花岗斑岩、流纹斑岩和流纹质 凝灰质熔岩、黑云母花岗岩等组成,各岩体均发生 强烈的蚀变或蚀变矿化,矿体主要产于火山管道相 的内外接触带上。矿床的近矿围岩主要为黑云母花 岗岩,成矿母岩为二长花岗斑岩。矿床蚀变类型为 中心面型,其水平与垂直分带明显。由内向外可分 为3个带,内带为石英-钾长石化带,主要发育在斑 岩体中,部分在在黑云母花岗岩中,为硅化强烈的 无矿核心,外圈为钼矿体主要赋存部位。中带为石 英-绢云母-水云母化带,该带位于接触带和岩脉交 互带断裂构造发育部位,发育在黑云母花岗岩、流 纹斑岩和流纹质凝灰质熔岩中,该带内侧为铜矿体 的主要赋存部位。外带为泥化带,位于矿体最外侧, 发育在黑云母花岗岩、流纹质凝灰熔岩中,黄铁矿 脉发育,并伴随铅锌矿化。与世界上典型的斑岩型



porphyry Cu-Mo deposit (modified after CHEN et al., 2008) 矿床围岩蚀变分带相比,该矿床缺失青磐岩化带,可能与矿床的中深剥蚀程度有关,导致其顶盖全被 剥蚀掉(秦克章等,1993)。

1.2 样品采集、分类统计及分析方法

试验中样品分别采自钻孔岩芯中和地表。钻孔 岩芯样品采自 ZK655、ZK654、ZK691、ZK694 四 个钻孔,样品采用连续捡块的方式采集,采样间距 5~7 m。共采集钻孔岩芯样品 170 件。为了探讨不同 蚀变类型岩石蚀变前后的质量变化,在所采集的 170 件样品中,根据每个钻孔中样品所处部位实际 蚀变情况,挑选出位于石英-钾长石化带(Q-Kf)的样 品 32 件、石英-绢云母化内带(Q-S(I))的样品 34 件、 石英-绢云母化外带(Q-S(O))的样品 33 件、伊利石-水云母化带(I-H)的样品 33 件,利用这些样品中元素 含量实测数据进行含量统计及质量迁移计算。

地表岩石样品采自离矿体较远且未见明显矿化 和蚀变地段的新鲜黑云母花岗岩,代表未蚀变原 岩。这里需要说明一点,受试验区基岩出露状况的 限制,所采集的地表岩石样品还是存在一定程度的 矿化现象,但是对试验结果不会产生根本性影响。

样品分析由中国地质科学院地球物理地球化学 勘查研究所中心实验室完成,常量元素分析仪器为 XRF-1500型X射线荧光光谱仪,微量元素用等离子 质谱仪(ICP-MS)、等离子体光学发射光谱 (ICP-OES)、压片法X-射线荧光光谱(XRF)等完成。 分析质量监控结果表明样品分析质量满足试验要求。

根据样品分析测试结果,统计得到试验区不同 类型岩石中元素平均含量如表1所示。

2 元素质量迁移及 Grant 方程

蚀变岩石中某种元素质量的变化取决于两种因素: (1)元素质量本身实际的变化; (2)元素质量本身 没有变化但受其它元素质量变化影响而变化。为解 决岩石在热液蚀变过程中元素带入带出问题, Gresens(1967)依据蚀变过程中岩石体积和组分浓度的 变化,提出了用于估算元素迁移的 Gresens 定量方 程。Grant(1986)通过假定某种元素在蚀变过程中没 有明显的带入带出,即惰性组分,根据 Gresens 方程 提出了另一种图解——等浓度线法。Grant 法的图解 以直角坐标系为基础,纵坐标为蚀变后岩石元素的 浓度(C_i^A),横坐标为原岩元素的浓度(C_i^O),将蚀变 岩石与原岩中元素的浓度投点到坐标系中,可拟合 出一条通过原点的直线,即等浓度线。等浓度线的 斜率代表蚀变前后岩石质量的变化,每个数据点对 等浓度线的方差定义为该点代表的某元素的浓度变 化。相比 Gresens 方程, Grant 方程的优势在于可免 去计算过程中对分析数据繁杂的处理和操作。

Grant 方程的形式如下:

 $C_i^{A}=(M^o/M^A)(C_i^{O}+\Delta C_i)$ (1) 其中 C_i^{A} 、 C_i^{O} 为蚀变岩和原岩中元素 i 的浓度, ΔC_i 为元素 i 的质量变化, M^A 、 M^O 为不同类型蚀变 岩和原岩的质量, 可通过确定的惰性组分求得。当 $\Delta C_i>0$ 时,代表该元素在蚀变过程中发生了带入; $\Delta C_i<0$ 时,则被带出。元素在热液蚀变过程中的得失 量最直接的衡量是计算某一元素的质量变化与其蚀 变前质量的比值($\Delta C_i/C_i^O$)。将(1)式两边同除以 C_i^O 经整理后得到:

 $\Delta C_i/C_i^o = (M^A/M^o)(C_i^A/C_i^o)-1$ (2) 在方程(2)中,求解的关键在于确定岩石蚀变过 程中的惰性组分,用来作为质量得失的参照标准。 有研究表明,Zr、TiO₂、Al₂O₃、Th 和 REE 均可能在 热液活动中保持惰性(Grant, 1986),尤其是 Al₂O₃、 TiO₂ 在很多热液矿床蚀变中均可作为惰性元素。结 合元素质量得失率计算结果,本文中确定 Al₂O₃ 为 惰性组分。

对于惰性组分而言, $\Delta C_i=0$, 公式(1)变为

 $C_i^{A} = (M^0/M^A)C_i^{O}$ (3)

根 据 (3) 式 得 出 等 浓 度 线 的 斜 率 即 K=C^A(Al₂O₃)/C^O(Al₂O₃), 当 K<1 时, 表示在蚀变过 程中岩石的质量增加; K>1 则表示岩石的质量减少。 由(3)可得出 M^O/M^A的值, 结合(1)、(2)式就可以计算 出蚀变岩石中元素相对于原岩的质量迁移量ΔC_i 和 元素质量变化百分率ΔC_i/C_i^O(表 2)。

3 元素质量迁移计算结果

在乌努格吐山试验区热液蚀变岩石与原岩中元 素质量迁移计算过程中发现,从黑云母花岗岩到石 英-钾长石化黑云母花岗岩、强石英-绢云母化黑云母 花岗岩、弱石英-绢云母化黑云母花岗岩到伊利石-水云母化黑云母花岗岩, Al₂O₃等浓度线的斜率分别 为 0.8、1.05、0.99、0.98,总体上看变化程度不大,而 且基本保持在 1 左右,说明在原岩蚀变过程中, Al₂O₃ 质量在各蚀变带中的变化较小,故选择 Al₂O₃ 作为计算元素质量迁移的参照标准。

元素质量迁移计算结果如图 2 和表 2 所示。 C_i^A-C_i^O图解(图 2)是根据表 1 中统计的原岩与各类蚀 变岩中元素平均含量在直角坐标系中投点得到的, 其中常量组分投点单位为%,微量元素除 Au、Ag 投 点单位为 10⁻⁹外,其余均为 10⁻⁶。这里需要说明一点, 因 为 元 素 含量 级 次 差 异 很 大 , 为 了 在 同 一 图

元素	图丨冈林华占	石英-钾长石化黑云	强石英-绢云母化黑云	弱石英-绢云母化黑	伊利石-水云母化黑云 母花岗岩(n=33)									
	羔云母化冈石	母花岗岩(n=32)	母花岗岩(n=34)	云母花岗岩(n=33)										
SiO ₂	69	73	70	71	71									
Al_2O_3	15	12	16	15	15									
Fe_2O_3	1.7	0.63	2.1	2.5	2.6									
MgO	0.39	0.16	0.51	0.30	0.20									
CaO	1.2	0.07	0.05	0.04	0.04									
Na ₂ O	4	0.49	0.22	0.22	0.21									
K_2O	3.7	6.9	5.5	4.9	4.6									
TiO_2	0.25	0.08	0.18	0.10	0.06									
Au	1.1	1.4	3.6	2.9	1.8									
Ag	135	174	1037	523	218									
As	17	66	150	55	64									
Ba	837	672	461	508	494									
Bi	0.10	0.04	0.34	0.30	0.27									
Co	2.6	1.6	7.9	10.9	7.4									
Cu	80	351	3468	2225	863									
F	331	417	1934	1377	1124									
Hg	14	38	111	62	162									
Mn	450	380	310	305	347									
Mo	4.9	167	60	27	5.7									
Pb	23	13	8.5	11	9.4									
Rb	137	62	101	96	94									
S	946	253	3660	4683	5527									
Sb	1.6	1.1	1.9	0.88	1.4									
Sn	1.4	2.9	8.1	7.5	6.8									
Sr	321	104	44	58	29									
W	2.4	4.4	11.3	9.0	6.6									
Zn	61	77	74	51	61									
Zr	189	85	116	91	87									
La	36	24	23	23	24.									
Ce	62	46	44	44	46									
Pr	8.0	5.2	5.1	4.9	5.2									
Nd	29	18	18	17	18									
Sm	4.7	3.2	3.2	3.3	3.3									
Eu	1	0.39	0.51	0.39	0.33									
Gd	4.2	2.7	3.0	3.0	3.0									
Tb	0.75	0.48	0.55	0.56	0.57									
Dy	4.1	2.8	3.2	3.3	3.5									
Но	0.85	0.57	0.64	0.69	0.73									
Er	2.6	1.8	2.0	2.2	2.3									
Tm	0.47	0.33	0.35	0.40	0.42									
Yb	3.3	2.3	2.4	2.7	2.8									
Lu	0.55	0.39	0.40	0.47	0.48									
∑REE	158	108	106	106	110									

表 1 乌努格吐山试验区不同类型岩石中元素平均含量 Table 1 Average contents of elements for rocks from Wunugetushan test area

注: 表中常量元素平均含量单位%, Au、Ag、Hg 平均含量单位 ng/g, 其他元素平均含量单位 µg/g; n 表示参加统计样品数量。





解中反映出多种元素的含量变化规律,有利于对比 分析,个别元素在 $C_i^A-C_i^o$ 图解中的投点不是按平均 含量而是按蚀变岩中元素含量比例进行的。在 $C_i^A-C_i^o$ 图解中,活动性较弱或不活动的元素位于等 浓度线附近,在等浓度线以上的元素表示相对原岩 含量增高,在等浓度线以下的元素表示相对原岩含 量降低。元素质量迁移量 ΔC_i 、元素质量变化百分率 $\Delta C_i/C_i^o$ (表 2)是根据 Grant 方程计算得来的。在表 2 中,元素质量迁移量(ΔC_i)为正值时表示该元素发生 带入作用,即富集;元素质量迁移量(ΔC_i)为负值时 表示该元素发生带出作用,即贫化。元素质量迁移 结果分述如下:

(1)在石英-钾长石化带中, SiO₂、K₂O、Mo、Cu、
W、Sn、Au、Ag、As、F和Hg等发生富集(迁移量 ΔC_i为正值), Fe₂O₃、MgO、CaO、Na₂O、TiO₂、Rb、
Sr、Sb、Bi、Co、Zr和∑REE发生贫化(迁移量ΔC_i 为负值)。其中K₂O、Mo、Cu、W、Sn、As、Hg富 集明显,质量变化百分率分别为 135%、4159%、
360%、129%、164%、388%、236%,而MgO、CaO、
Na₂O、TiO₂、Rb、Sr、Zr、Eu 贫化明显,质量变化
百分率分别为 51%、92%、85%、56%、43%、59%、 44%、51%。

(2)在石英-绢云母化内带中, Fe₂O₃、MgO、K₂O、
Mo、Cu、W、Sn、Au、Ag、As、Bi、Co、F、Hg
和 S 发生富集, CaO、Na₂O、TiO₂、Rb、Sr、Ba、
Sb、Bi、Pb、Mn、Zr 和∑REE 发生贫化。其中 Mo、
Cu、Au、Ag、W、Sn、Co、F、Hg、S 富集明显,质
量变化百分率分别为 1065%、4020%、209%、630%、
350%、450%、192%、456%、657%、268%, 而 CaO、
Na₂O、Sr、Ba、Zr、Eu 贫化明显,质量变化百分率
分别为 99%、95%、87%、48%、42%、51%。

(3)在石英-绢云母化外带中, Fe₂O₃、K₂O、Mo、 Cu、W、Sn、Au、Ag、As、Bi、Co、F、Hg 和 S 发生富集, MgO、CaO、Na₂O、TiO₂、Rb、Sr、Ba、 Sb、Bi、Pb、Zn、Mn、Zr 和∑REE 发生贫化。其中 Mo、Cu、Au、Ag、W、Sn、Co、F、Hg、As、Bi、 S 富集明显, 质量变化百分率分别为 464%、2723%、 173%、293%、283%、450%、331%、322%、350%、 224%、403%, 而 CaO、Na₂O、TiO₂、Sr、Ba、Sb、 Zr、Eu 贫化明显, 质量变化百分率分别为 99%、 95%、60%、82%、38%、44%、51%、60%。

(4)在伊利石-水云母化带中, Fe_2O_3 、 K_2O 、 Mo、

Cu、W、Sn、Au、Ag、As、Bi、Co、F、Hg 和 S 发生富集, MgO、CaO、Na₂O、TiO₂、Rb、Sr、Ba、 Sb、Bi、Pb、Mn、Zr 和∑REE 发生贫化。其中 Fe₂O₃、 Cu、W、Sn、As、Bi、Co、F、Hg、S 富集明显,质 量变化百分率分别为 55%、998%、183%、400%、 282%、170%、188%、246%、1086%、494%,而 MgO、CaO、Na₂O、TiO₂、Ba、Sr、Zr、Eu 贫化明 显,质量变化百分率分别为 49%、99%、95%、76%、 40%、91%、53%、66%。

4 元素质量迁移特征

乌努格吐山斑岩型铜钼矿床各蚀变带中元素质 量迁移对比图(图 3)和统计结果显示(表 3), 元素在 矿床各蚀变带中的质量迁移表现出一定的规律性, 这种规律性取决于元素的地球化学特性及其在矿化 过程中的地球化学性状。从表 3 中可以清楚地看出, 在乌努格吐山矿床各蚀变带中,发生带入作用的元 素主要是发生热液蚀变的元素、主成矿元素及其伴 生元素,这些元素在相应蚀变岩石中表现出富集特 征。发生带出的元素既有常量元素,又有微量元素, 微量元素主要是亲石分散元素、稀有元素及稀土元 素,这些元素在相应的蚀变岩石中表现出贫化特征, 这一点与已有相关研究结果一致。通常情况下, Cu、 Mo、Ag、S、Pb、Zn、Mn、As 等元素的异常规模 和规模较大,是斑岩铜矿床较为特征的指示元素。 Cu、Mo、Ag的强异常组合指示赋矿部位,S的高值 指示矿体的边缘, Pb、Zn、Mn、As 等的组合异常指 示远矿地段(黄书俊等, 1983)。矿床成矿元素自斑岩 体中心向外,具有 Mo(Cu)-Cu(Mo)-Cu、Ag-Cu(Pb、 Zn)的水平分带及斑岩体上部铜高,下部钼高的垂 直分带, 这与小赛什腾山斑岩铜钼矿床类似(李大新 等,2003)。

乌努格吐山矿床围岩蚀变分带明显,从内向外 依次为石英-钾长石化带(Q-Kf)、石英-绢云母化内带 (Q-S(I))、石英-绢云母化外带(Q-S(O))和伊利石-水云 母化带(I-H)。通过对不同蚀变带岩石中元素迁移特 性(带入、带出)和迁移量的对比,可以发现元素质量 迁移规律。

从最内部的石英-钾长石化带经石英-绢云母化 带向外到伊利石-水云母化带,常量元素的带入带出 表现出不同的规律。Fe₂O₃的带入量逐次增高,SiO₂、 K₂O 总体带入量降低,与 Fe₂O₃呈现出负相关关系。 CaO、Na₂O 带出特征显著,MgO 总体表现出带出特 征,而且在各蚀变带中的带出量各自大体相同,表 明这些元素的带出在整个矿化蚀变范围内基本上是



图 3 蚀变岩石中元素质量迁移对比图(直方图上方锯齿 状部分表示某些元素含量大于图中纵坐标的最大值) Fig. 3 Comparison histogram showing gain and loss of selected elements in altered rocks(zigzag zones show some elements' contents are higher than the maximum of ordinate in the histogram)

相同的。

在微量元素中, 主成矿元素 Cu 最小带入量出现 在石英-钾长石化带内, 最大带入量出现在石英-绢 云母化带的内侧, 此后向外蚀变带依次降低。Cu 最 大带入量发生部位与实际矿体产出位置吻合。Au、 Ag、As、Bi、F、W、Sn 等元素的迁移量变化趋势 与 Cu 相同, 表明这些的带入与 Cu 矿化关系密切。 Mo 最大带入量出现在石英-钾长石化带中, 与 Mo 矿体产出位置吻合, 向外带入量逐次减少, 表现出

	Table 2	e 2 Calculated results of major and trace elements during migration in altered wall rock									
元素	石英-钾长石化黑云母		强石英-绢]云母化黑云母 + 山山	弱石英-绢	云母化黑云母 +山山	伊利石-水云母化黑云母				
	化肉石		1	七冈石	1		花岗岩				
	ΔC _i	$\Delta C_i / C_i^{\circ}$	ΔC _i	$\Delta C_i/C_i^{O}$	ΔCi	$\Delta C_i/C_i^{O}$	ΔCi	$\Delta C_i/C_i$			
SiO ₂	23	33	-2.8	-4.1	2.8	4.1	3.8	5.5			
Al_2O_3	0.01	0	0	0	0	0	0	0			
Fe ₂ O ₃	-0.96	-56	0.21	12	0.75	44	0.93	55			
MgO	-0.2	-51	0.09	23	-0.09	-23	-0.19	-49			
CaO	-1.1	-92	-1.2	-99	-1.2	-99	-1.2	-99			
Na ₂ O	-3.4	-85	-3.8	-95	-3.8	-95	-3.8	-95			
K_2O	5	135	1.4	38	1.5	40	0.98	26			
Cu	360	450	3216	4020	2178	2723	798	998			
Mo	204	4159	52	1065	22.73	464	0.91	19			
S	-629	-66	2533	268	3808	403	4676	494			
Au	0.65	59	2.3	209	1.9	173	0.73	66			
Ag	83	61	851	630	396	293	87	64			
As	66	388	126	741	38	224	48	282			
Bi	-0.05	-50	0.22	220	0.21	210	0.17	170			
W	3.1	129	8.4	350	6.8	283	4.4	183			
Sn	2.3	164	6.3	450	6.3	450	5.6	400			
Co	-0.59	-23	5	192	8.6	331	4.9	188			
F	192	58	1508	456	1067	322	813	246			
Hg	33	236	92	657	49	350	152	1086			
Zn	36	59	9.2	15	-9.1	-15	0.87	1.4			
Mn	26	5.8	-155	-34	-140	-31	-97	-22			
TiO ₂	-0.14	-56	-0.07	-28	-0.15	-60	-0.19	-76			
Zr	-83	-44	-79	-42	-96	-51	-100	-53			
Ba	5	0.6	-398	-48	-321	-38	-334	-40			
Sr	-190	-59	-279	-87	-262	-82	-292	-91			
Rb	-59	-43	-41	-30	-40	-29	-41	-30			
Pb	-6.2	-27	-15	-65	-11	-48	-13	-57			
Sb	-0.26	-16	0.17	11	-0.7	-44	-0.18	-11			
La	-6	-17	-14	_39	-13	-36	-12	_33			
Ce	-5	-8	-20	-32	-17	-2.7	-16	-26			
Pr	-1.5	-19	_3 2	-40	_3	_38	_2 7	_34			
Nd	_5 7	-20	-12	-41	-11	-38	_11	-38			
Sm	_0.77	-16	_1 7	-36	_1 4	-30	_1 4	-30			
Fu	-0.51	-51	_0.51	-51	-0.6	-60	-0.66	-66			
Gd	-0.51	-51	-0.51	-51	-0.0	-00	-0.00	-00			
Th	-0.70	-18	-1.4	-55	-1.2	-29	-1.2	-29			
10 Du	-0.15	-20	-0.23	-31	-0.18	-24	-0.17	-23			
Dy	-0.01	-13	-1.1	-27	-0.09	-17	-0.34	-13			
по Ба	-0.14	-10	-0.24	-28	-0.15	-18	-0.11	-13			
Eľ	-0.34	-13	-0.75	-29	-0.58	-15	-0.20	-10			
1 m	-0.06	-13	-0.14	-30	-0.06	-13	-0.04	-8.3			
Ϋ́b	-0.41	-12	-0.97	-30	-0.54	-16	-0.4	-12			
Lu	-0.06	-11	-0.17	-31	-0.07	-13	-0.06	-11			
∑REE	-22	-14	-57	-36	-50	-32	-45	-28			

表 2 蚀变岩石中元素质量迁移计算结果

注:表中 ΔC_i 表示元素质量迁移量, $\Delta C_i/C_i^o$ 表示元素质量变化百分率,单位为%。

	表 3	各蚀变带岩石中元素质量迁移结果统计表
Table 3	Statistica	l diagram of element migration result in altered wall rock

元素	SiO_2	$Al_2O_3\\$	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cu	Mo	S	Au	Ag	As	Bi	W
石英-钾长石化带	++	0					+++	+++	+++	-	++	++	+++	-	+++
石英-绢云母化内带	-	0	+	+			++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
石英-绢云母化外带	+	0	++	-			++	+++	+++	+++	+++	+++	++	+++	+++
伊利石-水云母化带	+	0	++				+	+++	+	+++	++	++	+++	+++	+++
元素	Sn	Co	F	Hg	Zn	Mn	TiO ₂	Zr	Ba	Sr	Rb	Pb	Sb	∑REE	-
石英-钾长石化带	+++	-	+	+++	++	+			-			-	-	-	
石英-绢云母化内带	+++	+++	+++	+++	+	-	-						+		
石英-绢云母化外带	+++	+++	+++	+++	-	-									
伊利石-水云母化带	+++	++	+++	+++	+	-							-	-	

注: "+"表示元素带入, "+"个数越多表示带入量越大; "-"表示元素带出, "-"个数越多表示带出量越大; "0"表示元素基本没有发生 迁移。

特有的质量迁移特性。Co 在石英-钾长石化带中表 现出带出特性,在外蚀变带中表现为带入特点,这 种质量迁移特征与主成矿元素 Cu、Mo 都不相同。 Hg 在每个蚀变带中都表现为带入, 但是最大带入量 出现在伊利石-水云母化带中, 即出现在矿化蚀变带 的最外侧,表现出远程指示元素的特点。与作为参 照的试验区黑云母花岗岩中 S 含量相比, S 在石英-钾长石化带中表现出带出特性,但是如果与 S 在花 岗岩中的丰度相比, S 在石英-钾长石化带中表现出 较为明显的带入特点。向外从石英-绢云母化内带开 始带入量逐渐加大,最大带入量出现在最外侧的伊 利石-水云母化带内。结合试验区出现的黄铁矿化分 析, S 的质量迁移不仅控制了试验区内主成矿元素 Cu、Mo 的迁移和沉淀, 还控制了其他元素, 例如 Fe 的迁移和沉淀以及黄铁矿化的形成(刘英俊等, 1984)。可以这样认为, S 的质量迁移是决定矿化是否 形成的必要前提之一。Fe、Co、Mn、Ti等铁族元素 在石英-钾长石化带,即矿体部位基本上表现为带出, 与 Mo、Cu、Au、Ag 等成矿元素的显著富集构成明 显正、负异常结构,很好地指示了矿体位置 (Goldbery et al., 2003).

除上述发生质量带入的微量元素以外,还有部 分微量元素在蚀变过程中发生质量带出,主要是 Ti、Zr、Ba、Sr、Rb和REE(15项指标)。蚀变岩中 稀土元素质量迁移计算结果表明,稀土元素受到矿 化蚀变的影响较大,各蚀变岩中稀土元素大都发生 了明显的带出($\Delta C_i/C_i^o>25\%$),尤其是在绢英岩化带 中。轻、重稀土元素表现出差异性活动特征,轻稀 土(La 至 Gd)的贫化较重稀土(Tb 至 Lu)更显著,尤其 是 Eu 的强烈贫化。从总体上讲,这些微量元素的带 出量在各个蚀变带中差异不显著,也就是元素的带 出在整个矿化蚀变范围内基本上是相同的,这一点与 CaO、Na₂O 的带出特征大体一致。

值得一提的是,在乌努格吐山斑岩型铜钼矿床 中,Pb、Sb两个元素总体表现为带出的特征,特别是 Pb在整个矿化蚀变带内都表现为带出的特点。Mn、 Zn的带入带出特征均不甚明显。Pb、Zn、Sb通常 是热液矿床地球化学勘查中使用最普遍的指标,出 现这样的带入带出特点可能与矿床的中等剥蚀程度 有关,但也可能是通过元素质量迁移计算揭示出的 新现象。

5 结论

越来越多的试验结果表明, 元素的富集贫化是 矿床中固有的客观规律之一,利用这种规律可以研 制出相应的地球化学勘查方法技术, 切实为找矿突 破战略行动提供技术支撑。矿床中元素富集贫化的 实质是矿化蚀变过程中元素的带入带出,本文利用 Grant 方程, 计算了乌努格吐山矿床蚀变围岩中元素 的质量迁移, 定量地证实了矿化蚀变中元素的带入 带出现象,这不仅再一次证实乌努格吐山矿床中元 素富集贫化特征的存在,更重要的是为定量探讨矿 床中元素的富集贫化规律提供了一个可行的思路和 方法。可以预见,利用元素质量迁移定量计算方法, 可以将富集、贫化两类指标有机地结合起来形成量 化的地球化学勘查指标, 通过大量试验案例的总结 归纳、赋予这些指标在矿体埋藏深度、矿化规模等 方面的地质涵义,进而指导地球化学勘查工作,其 重要意义是显而易见的。

参考文献:

陈志广, 张连昌, 万博, 张玉涛, 吴华英. 2008. 内蒙古乌奴格吐

山斑岩铜钼矿床低 Sr-Yb 型成矿斑岩地球化学特征及地质 意义[J]. 岩石学报,24(1):115-128.

- 弓秋丽,朱立新,马生明,席明杰. 2009. 斑岩型铜矿床地球化学勘查中岩石化学指标[J]. 物探与化探, 33(1): 31-34.
- 黄书俊, 郦今敖, 傅金宝, 王建业. 1983. 斑岩铜矿床原生晕分 带模式及与其控制因素[J]. 地球化学, (3): 221-228.
- 李大新,张德全,崔艳合,丰成友.2003.小赛什腾山斑岩铜(钼) 矿床根部带的特征[J].地球学报,24(3):211-218.
- 李双保. 1994. 热液交代蚀变作用元素迁移定量研究方法在矿 床、岩石研究中的应用(二)[J]. 国外前寒武纪地质, 65(1): 33-43.
- 梁胜跃,马生明,朱立新,刘崇民,陈晓峰.2010. 乌努格吐山斑 岩型铜钼矿床地球化学异常结构研究[J]. 物探与化探, 34(2):821-830.
- 刘英俊,曹励明,李兆麟,王鹤年,储同庆,孙景荣. 1984. 元素 地球化学[M]. 北京:科学出版社.
- 马生明,朱立新,刘崇民,陈晓峰,梁胜跃.2009. 斑岩型 Cu(Mo) 矿床中微量元素富集贫化规律研究[J]. 地球学报,30(6): 821-830.
- 马生明,朱立新,刘海良,王会强,徐明钻.2011. 甘肃北山辉铜 山铜矿地球化学异常结构研究[J]. 地球学报, 32(4): 405-412.
- 秦克章,王之田.1993.内蒙古乌奴格吐山铜-钼矿床稀土元素的 行为及意义[J].地质学报,67(4):323-335.
- 宋国利, 刘钊. 1985. 内蒙乌奴格吐山斑岩铜钼矿床围岩蚀变机理分析[J]. 哈尔滨示范大学自然科学版, (4): 75-81.
- 唐相伟,李运冬,易善涛.2010.河南商城县汤家坪钼矿床围岩 蚀变过程中元素迁移规律[J].四川地质学报,30(3): 284-287.
- 王荣全, 宋雷鹰, 曹书武, 贾继标. 2007. 乌奴格吐山斑岩铜-钼 矿地球化学特征及评价标志[J]. 矿产与地质, 21(5): 515-519.
- 王睿. 2009. 从江翁浪地区蚀变岩型金矿微量元素地球化学特征[J]. 地球学报, 30(1): 95-102.
- 王之田,秦克章. 1991. REE 在判别斑岩体含矿性上的应用[J]. 地质科技情报,10(2): 37-41.
- 王祖伟,周永章,张海华,姚东良,夏怡,吴家勇,李春武.1998. 粤西廉江银金矿床围岩蚀变特征及元素迁移的定量估计[J]. 地球化学,27(3):251-257.
- 张生,李统锦,陈义兵. 1997. 长坑矿床矿化过程中元素的质量迁移及金银关系[J]. 地质找矿论丛, 12(3): 33-40.

- 周永章, 涂光炽, CHOWN E H, GUHA J, 卢焕章. 1994. 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, 39(11): 1026-1028.
- 周忠政, 宋作均. 2008. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床围岩蚀 变特征浅析[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 9(4): 46-50.

References:

- APPLEYARD E C. 1980. Mass balance computations in metasomatism: Metagabbro/nepheline syenite pegmatite interaction in northern Norway[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 73(2): 131-144.
- CHEN Zhi-guang, ZHANG Lian-chang, WAN Bo, ZHANG Yu-tao, WU Hua-ying. 2008. Geochemistry and geological significances of ore-forming porphyry with low Sr and Yb Value in Wunugetushan copper-molybdenum deposit, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(1): 115-128(in Chinese with English abstract).
- GOLDBERY I S, ABRAMSON G Y, LOS V L. 2003. Depletion and enrichment of primary haloes: their importance in the genesis of and exploration for mineral deposits[J]. Geochemistry, 3(3): 281-293.
- GONG Qiu-li, ZHU Li-xin, MA Sheng-ming, XI Ming-jie. 2009. Petrochemical indices in geochemical exploration of porphyry type copper deposits[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 33(1): 31-34(in Chinese with English abstract).
- GRANT J A. 1986. The isocon diagram; a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration[J]. Economic Geology, 81(8): 1976-1982.
- GRESENS R L. 1967. Composition-volume relationships of metasomatism[J]. Chemical Geology, 2: 47-65.
- HUANG Shu-jun, LI Jin-ao, FU Jin-bao, WANG Jian-ye. 1983. Zoning Patterns of Primary Halos and Their Comtrolling Factors in Porphyry Copper Deposit[J]. Geochemica, (3): 221-228(in Chinese with English abstract).
- LI Da-xing, ZHANG De-quan, CUI Yan-he, FENG Cheng-you. 2003. The Root Part of the Xiaosaishitengshan Porphyry Cu(Mo) Deposit[J]. Acta Geoscientica Sinica, 24(3): 211-218(in Chinese with English abstract).
- LI Shuang-bao. 1994. The applied of quantitative estimation re-

search method on element migration in hydrothermal wall-rock alteration in the researchment of deposit and rock[J]. Foreign Precambrian Geology, 65(1): 33-43(in Chinese with English abstract).

- LIANG Sheng-yue, MA Sheng-ming, ZHU Li-xin, LIU Chong-min, CHEN Xiao-feng. 2010. Geochemical anomaly structure of the Wunugetushan porphyry copper and molybdenum deposit[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 34(2): 821-830(in Chinese with English abstract).
- LIU Ying-jun, CAO Li-ming, LI Zhao-lin, WANG He-nian, CHU Tong-qing, SUN Jing-rong. 1984. Element Geochemistry[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- MA Sheng-ming, ZHU Li-xin, LIU Chong-min, CHEN Xiao-feng, LIANG Sheng-yue. 2009. A Study of the Enrichment and Depletion Regularity of Trace Elements in Porphyry Cu(Mo) Deposits[J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(6): 821-830(in Chinese with English abstract).
- MA Sheng-ming, ZHU Li-xin, LIU Hai-liang, WANG Hui-qiang, XU Ming-zuan. 2011. A Study of Geochemical Anomaly Structure of the Huitongshan Copper Deposit in Beishan Area, Gansu Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(4): 405-412(in Chinese with English abstract).
- MORTON R L, NEBEL M L. 1984. Hydrothermal alteration of felsic volcanic rocks at the Helen siderite deposit, Wawa, Ontario[J]. Economic Geology, 79(6): 1319-1333.
- QIN Ke-zhang, WANG Zhi-tian. 1993. Rare earth element behaviour in the Wunugetushan Cu-Mo deposit, inner Mongolia and its significance[J]. Acta Geologica Sinica, 67(4): 323-335(in Chinese with English abstract).
- SONG Guo-li, LIU Zhao. 1985. A discussion on the alteration mechanism of the copper-molybdenum deposit in Wunugetushan, Mongolia[J]. Natural Science Journal of Habin Normal University, (4): 75-81(in Chinese).
- TANG Xiang-wei, LI Yun-dong, YI Shan-tao. 2010. Element migration during wall-rock alteration in the Tangjiaping Mo de-

posit, Shangcheng, Henan[J]. Acta Geologica Sichuan, 30(3): 284-287(in Chinese with English abstract).

- WANG Rong-quan, SONG Lei-ying, CAO Shu-wu, JIA Ji-biao. 2007. Geochemical characteristics of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit and its evaluation indicators[J]. Mineral Resources and Geology, 21(5): 515-519(in Chinese with English abstract).
- WANG Rui. 2009. Trace Elements Geochemical Characteristics of the Wenglang Structural Altered Rock Type Gold Deposit, Congjiang Courtry[J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(1): 95-102(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhi-tian, QIN Ke-zhang. 1991. Application of REE in evaluating the ore potentiality of porphyry bodies[J]. Geological Science and Technology Information, 10(2): 37-41(in Chinese with English abstract).
- WANG Zu-wei, ZHOU Yong-zhang, ZHANG Hai-hua, YAO Dong-liang, XIA Yi, WU Jia-yong, LI Chun-wu. 1998. Characteristics and quantitative estimation on element migration in hydrothermal wall-rock alteration in Lianjiang Silver-Gold deposit, western Guangdong Province, south China[J]. Geochimica, 27(3): 251-257(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Sheng, LI Tong-jin, CHEN Yi-bing. 1997. Mass transfer in mineralizing process and Au-Ag relation in the Changkeng deposit[J]. Conributions to Geology and Mineral Resources Research, 12(3): 33-40(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yong-zhang, TU Guang-chi, CHOWN E H, GUHA J, LU Huan-zhang. 1994. The search of unvaried mathematics and quantitative estimation on element migration in hydrothermal wall-rock alteration- exemplified by the Hetai Gold Field[J]. Chinese Science Bulletin, 39(11): 1026-1028(in Chinese).
- ZHOU Zhong-zheng, SONG Zuo-jun. 2008. A discussion on the alteration features of the copper-molybdenum deposit in Wunugetu Mountain, Mongolia[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 9(4): 46-50(in Chinese with English abstract).