

从离子半径变化看元素地球化学场中的成矿分带*

林小明, 陈国能

(中山大学地球科学系, 广东 广州 510275)

摘要: 元素地球化学场揭示了与门捷列夫周期律相适应的、元素在内生过程中的聚散趋势和空间分布规律。在元素地球化学场展示的3个不同层次的地球化学断面中, 花岗岩体断面上成矿元素的析出顺序, 与元素在周期表中的位置有明确的对应关系。为此, 从元素自身结构变化的角度, 探讨这种现象的原因。研究结果表明, 与花岗岩有关的热液成矿元素的析出顺序和分带规律, 与元素的离子半径和离子电位密切相关。

关键词: 原地重熔说; 元素地球化学场; 成矿元素分带; 离子半径与离子电位

中图分类号: P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2002) 05-0091-04

传统岩浆论认为花岗岩浆起源于深部源区, 然后通过某种通道向上运移, 最后在地壳浅部定位, 经冷凝固结后形成岩体^[1,2]。基于这一认识, 与花岗岩有关的热液矿床的物质来源, 被认为有两种可能: 一是来自岩浆本身, 此为经典的“岩浆热液说”; 二是由入侵的岩浆从地层中“萃取”^[3]。按照前者的逻辑延伸, 岩体越大, 岩浆带来的成矿物质应越多, 大岩基周围的成矿概率应越高; 按后者, 岩浆房(岩基)越大, 岩浆可从围岩“萃取”元素的面积越大、“萃取”的时间越长, 故同样是岩基越大, 其周围的成矿概率应越高。但事实上, 花岗岩热液矿床的产出多与小岩体有关, 例如广西大厂^[4,5]、湖南柿竹园^[6,7]、江西西华山^[8]等。相反, 在大岩基, 例如诸广山、大东山、佛冈等岩基的周围, 甚少有与其相关的热液矿床的分布。显然, 上述模型的理论预期与观测结果不相容。

与侵入说不同, 近年提出的“原地重熔说”^[9,10]视上陆壳为封闭系统, 认为花岗岩的形成是壳内物质随着系统熵的变化而从有序(原始岩石)到无序(熔浆), 再到新的有序(花岗岩)的结果; 花岗岩的成岩与成矿物质, 均来自卷入重熔的原始岩石; 岩石的熔融或重熔过程导致了元素的重新分配和重新组合。在原地重熔说的框架中, 不论是在岩石熔化和岩浆结晶过程, 抑或岩浆期后的热液成矿过程, 各类元素的迁移富集及空间分布, 均显得甚为有序。为此, 陈国能^[9,10]进一步提出了“元素地球化学场”概念, 揭示了化学元素在三个

不同尺度的地学断面, 即地球球体断面、大陆地壳断面和岩体顶部断面上的空间分布规律。在上述研究的基础上, 本文试图从元素自身结构的角度, 探讨岩体顶部热液成矿元素分带的原因。

1 岩体顶部和上部成矿元素分带规律

在重熔岩浆固结过程中, 硫及各种亲硫元素因无法加入硅酸盐矿物的晶格而在残余相和气相中逐渐富集, 并向低压区(重熔界面的突起部位)运移和聚集, 最终以气液流体的形式被排出熔融-结晶系统之外^[9]。被排出系统的含矿流体在上升过程中, 其内的成矿元素(化合物)随着温度递减而逐渐析出。由于不同成矿元素(化合物)的析出温度不同, 从而造成岩体顶部和上部热液成矿作用的分带性。

对于元素周期表中第五、第六周期的副族成矿元素而言, REE、Zr、Hf、Nb和Ta属岩浆场的元素, 其分布主要在重熔界面以下。对众多含矿岩体的研究表明, 上述元素通常在分异程度较高的岩体的顶部富集, 且各元素的最大富集区间一般不会重叠; 从岩体顶部向下, 成矿元素的最大富集带通常按Ta→Nb→REE的顺序排列(图1)。

在上述副族成矿元素中, W、Mo是热液成矿过程的高温端元, 且两者密切共生。从图1(b)可见, 热液型钨矿的产出部位, 一般在岩体与围岩的接触带附近。图2是江西黄沙钨矿的地质剖面, 清楚地展示了钨的最大富集带与花岗岩体的空间关

* 收稿日期: 2002-04-08

基金项目: 国家重大基础研究(973)资助项目(2001DC409809); 高等院校博士点基金项目(01-32110-4101705)

作者简介: 林小明(1975年生), 男, 博士生; 通讯联系人: 陈国能; E-mail: ce28@zsu.edu.cn

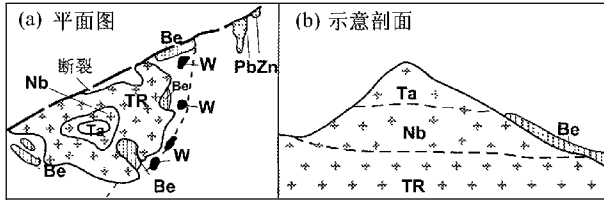


图 1 430 岩体的成矿分带示意图^[9]

Fig 1 Mineral zones of No. 430 granite massif in Hunan
The left is a plan while the right is a profile

系。对华南众多的石英脉型钨钼矿床的统计结果表明, 在含钨钼的石英脉中, W 的最大丰度带通常位于脉体的中上部, 而 Mo 的最大丰度带则位于脉体的中下部^[12]。

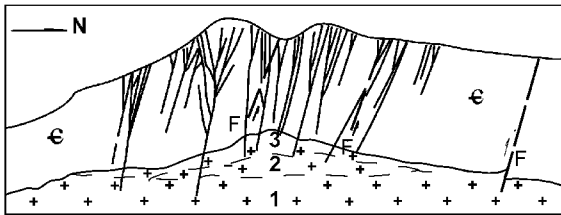


图 2 江西黄沙钨矿的地质剖面^[12]

Fig 2 Geological section of the Huangsha Tungsten deposit, Jiangxi
1. 气石化二云母花岗岩 (REE);
2. 钠长石化花岗岩 (Nb、Ta);
3. 云英岩化花岗岩;
ε 为寒武系; F 为断裂;
地层中的分叉线条为钨矿脉

Cu、Zn (包括主族元素 Pb) 为典型的中温成矿元素。在矿脉中, Cu 的最大丰度带通常位于 Zn (Pb) 的下方 (图 3)^[9], 说明在热液成矿过程中, Cu 的沉淀析出一般较 Zn (Pb) 早。

Au 与 Ag 共生。在热液型的金银矿床中, 金的丰度带一般位于银的丰度带之上。以湖南桂阳大坊金银矿床为例。该区内的矿体主要赋存于破碎带中, 分别形成了猫儿岭和腊树下 2 个矿段。两者的地表氧化矿均富含贫银, 而深部则为原生富银矿^[13]。

图 4 为广东长坑金银矿床 4 线剖面图。可以看到, 浅部矿体以 Au 为主, 深部矿体则以 Ag 为主 (图 4)。

Hg 属低温成矿元素, 其产出位置通常远离岩体^[9], 图 3(b) 已清楚显示出这一关系。

2 离子半径变化与成矿元素分带关系

图 5 是元素地球化学场揭示的岩体上方和顶部盖层副族成矿元素分布规律。图的右方是综合前述

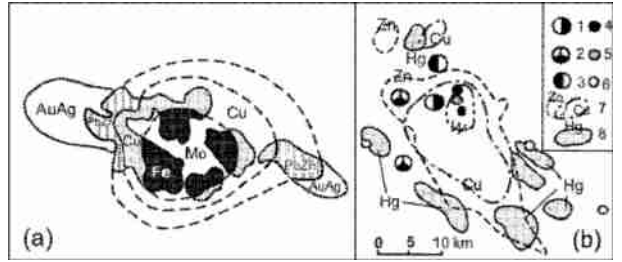


图 3 (a) 七宝山矿区矿石类型分带示意图
(b) 广西龙箱盖隐伏岩体金属矿床及化探异常
(据陈国能, 1996)

Fig 3 (a) The ore zoning in Qibaoshan Mine, Hunan;
(b) Ore deposits and geochemical anomalies of the Xianggai concealed granite body in Dachang, Guangxi
(a) Mo, 钼矿化; Fe, 磁铁矿; Cu, 硫铜矿;
PbZn, 铅锌硫铜矿; AuAg, 含金银锰土
(b) 1. 铜锌锡矿床; 2. 铅锌锡矿床; 3. 锌锡矿床;
4. 钨矿床; 5. 锡矿床; 6. 汞矿床; 7. 化探异常;
8. 重砂异常

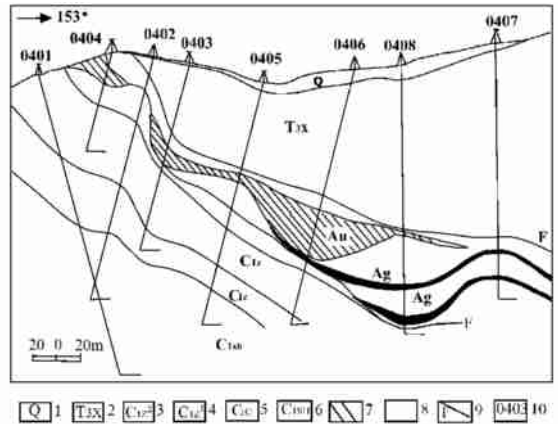


图 4 广东长坑金银矿床 4 线剖面
(据广东地矿局 757 地质队, 1994 改编)

Fig 4 The fourth cross section of the Changkeng Au Ag ore deposit

1. 第四系; 2. 上三迭统; 3. 下石炭统梓门桥组上段;
4. 下石炭统梓门桥组下段; 5. 下石炭统测水组;
6. 下石炭统石碇子组; 7. 金矿体; 8. 银矿体;
9. 断层破碎蚀变带; 10. 钻孔及编号

大量成矿元素分带资料建立的地质断面, 其中花岗岩与盖层的接触界面即为重熔界面(MI), 它代表重熔过程中壳内的固、熔二相界面。图的左方显示各副族成矿元素在周期表中的位置及其在热液成矿过程中的沉淀析出顺序。IVB 与 VB 族, 即 W、Mo 与 Nb、Ta 之间的界线为重熔界面的位置^[9]。在地质断面中, 重熔界面之下为花岗岩, 之上为沉积-变质盖层; 在元素地球化学场中, 界面之下为岩浆场, 之上为热液场 (图 5)。

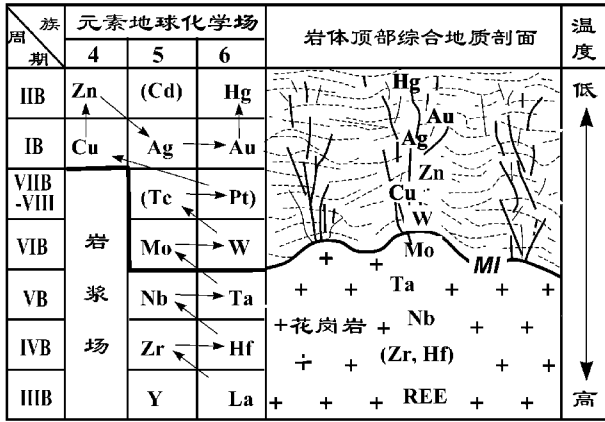


图 5 重熔界面上、下的副族成矿元素分带及其与元素地球化学场的关系 (据陈国能, 1999, 略有改动)

Fig. 5 Mineral zones at and over the top of granite body and its relation to geochemical field of elements

从图 5 的地质断面可见, 地温梯度可能是造成上述成矿元素分带最重要的环境因素; 而图 5 左侧的元素地球化学场, 则显示随着温度的变化, 元素的沉淀析出顺序与元素自身结构有关。我们知道, 常见的成矿元素通常在矿物中表现出比较稳定的离子价态, 并符合离子体系的电中性原理和配位法则, 即离子的配位数取决于阳离子与阴离子的半径比。在离子性晶体中, 只有当阴阳离子完全紧密接触时, 才能形成稳定的化合物价 (注: 由于汞、金在自然界中常以 0 价态分布, 故视为离子半径的特例)。表 1 给出了上述岩浆场和热液场主要副族成矿元素的电价、离子半径及离子电位。其中的离子半径是采用善农 (Shannon) 和波维特 (Prewitt) 的“有效”离子半径^[14], 后者是通过实测晶体中的原子间距, 同时考虑了离子价态和配位数等计算而得, 可以说是目前较详尽和较具代表性的离子半径体系^[14, 15]。

从表 1 可见, 在岩浆场中, 上述副族成矿元素的离子半径自重熔界面向下逐渐增大; 在热液场中, 变化方向却恰恰相反。

离子电位 (π) 通常用于衡量离子在化学反应中争夺价电子的能力, 其定义为: $\pi = Z/r$; 其中 Z 为离子的电荷, r 为离子半径。如表 1 所示, 上述副族成矿元素的离子电位, 同样以重熔界面为界, 向上和向下两个方向逐渐降低。

综上所述, 影响岩体顶部和上部副族成矿元素沉淀析出顺序的因素, 除了作为外部条件的地温梯度之外, 元素自身结构也是一个重要因素, 但两者间的关系仍是有待研究的问题。在元素自身结构的诸多要素中, 离子半径以及与其相关的离子电位,

表 1 第五、第六周期副族成矿元素的离子半径及离子电位
Tab 1 Ionic radius and electric potential of some ore-forming elements

元素地球化学场	成矿元素	离子价态	离子半径/nm	离子半径变化趋势	离子电位 (π 值)
热液场	Hg	Hg ⁰	0.155	↓	0.86 2.7 2.74 10 10.17
	Au	Au ⁰	0.144		
	Ag	Ag ¹⁺	0.115		
	Zn	Zn ²⁺	0.074		
	Cu	Cu ²⁺	0.073		
	W	W ⁶⁺	0.060		
岩浆场	Mo	Mo ⁶⁺	0.059	↓	7.81 7.81 5.63 5.56 3.19~3.49 2.91~3.16
	Ta	Ta ⁵⁺	0.064		
	Nb	Nb ⁵⁺	0.064		
	Hf	Hf ⁴⁺	0.071		
	Zr	Zr ⁴⁺	0.072		
	Gd-Lu	A ³⁺	0.086~0.094		
La-Eu	A ³⁺	0.095~0.103			

有可能是最重要、或者说最明显的因素。重熔界面不但是花岗岩与沉积—变质盖层的分界, 岩浆场与热液场的分界, 同时也是副族成矿元素离子半径和离子电位向不同方向演化的分界。

元素地球化学场揭示了原地重熔过程中岩体顶部和上部盖层的副族成矿元素, 随着温度变化而呈现的分带规律, 以及这种分带与元素自身结构变化的关系。本文的研究表明, 自重熔界面向上和向下, 成矿元素的离子半径均呈规律性增加, 而离子电位相应逐渐降低, 由此说明在元素自身结构的诸多要素中, 元素的离子半径和离子电位, 可能是在上述外部环境中, 决定元素沉淀析出顺序的最重要因素。

参考文献:

[1] BOWEN N L. The granite problems and the method of multiple prejudices [J]. Soc Am Mem, Origin of Granite Geol, 1948, 28: 79-90.

[2] BROWN M. The generation, segregation, ascent and emplacement of granite magma; the migmatite-crustally-derived granite connection in thickened orogens [J]. Earth Sci Rev, 1994, 36: 83-130.

[3] 柳志青. 脉状钨矿成矿预测理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 1-119.

[4] 陈毓川, 毛景文. 桂北地区矿床成矿系列和成矿历史演化轨迹 [M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1995: 92-127.

[5] 叶绪孙, 严云秀, 何海洲. 广西大厂超大型锡矿成矿条件与历史演化 [J]. 地球化学, 1999, 28: 213-221.

[6] 刘英俊, 张景荣. 柿竹园钨、钼、铋、锡 (铍) 矿床成矿作

- 用的某些问题[J]. 地质与勘探, 1983, 5: 8-14.
- [7] 王昌烈, 罗仕徽, 胥友志. 柿竹园钨多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 12-40.
- [8] 吴永乐, 梅勇文, 刘鹏程. 西华山钨矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1-122.
- [9] 陈国能, 曹建劲, 张珂. 原地重熔与元素地球化学场[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-93.
- [10] CHEN G N. Geochemical field of elements and its geo-implications[J]. J Geosci of China, 1999, 1(1): 1-7.
- [11] 陈国能, 张珂, 邵荣松, 等. 原地重熔及其地质效应[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2001, 40(3): 95-99.
- [12] 夏宏远, 梁书艺. 华南钨锡稀有金属花岗岩成因系列[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 12-15.
- [13] 王福山, 钟东球. 湖南省桂阳大坊银金矿床地质特征及控矿条件//金矿地质与勘探论文集[C]. 北京: 冶金工业出版社, 1992: 319-326.
- [14] 赵伦山, 张本仁. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 60-75.
- [15] 陈道公, 支霞臣, 杨海涛. 地球化学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1994: 327-345.

Studies on the Mineral Zoning Indicated by Geochemical Field of Elements

LIN Xiao ming, CHEN Guo neng

(Department of Geosciences, Sun Yat sen(Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The geochemical field of elements (GFE) advanced in the recent years unraveled both the concentration dispersion trends of elements in endogenic process corresponding to the periodic law, and the spatial distribution patterns of elements in the Earth. Among the patterns, one illustrates the mineral zoning of ore forming elements on the top and in the roof of a granite body and its relation to the position of the elements in the periodic table. On the basis, this paper tries to search for the reason of this relation. The research result indicates that the mineral zoning mentioned above is closely related to the ionic radius and electric potential of those elements.

Key words: melting *in situ* hypothesis; geochemical field of elements; mineral zoning; ionic radius and electric potential