

# 成矿系统的结构与聚矿功能

李人澍 朱华平

(西北有色地质研究所,西安,710054)

**摘 要** 成矿系统结构对成矿动力学条件的约束与促进,引起系统固有聚矿功能的巨大变异。成矿系统动力学包括:系统运转的动力组合、系统物质运动总方向和轨迹、矿质活动空间规模形态及单位空间中成矿微过程的频度。系统结构定性分析表明:系统结构的完善程度和成矿动力学条件的优劣与系统聚矿功能的强度正相关。系统结构完善程度可由结构紧致度( $I$ )表征,系统聚矿功能可用标准富集量( $Q_s$ )反映,它是矿床储量( $Q_0$ )经成矿难度系数( $C$ )变换的归一化指标。经结构定性半定量分析,对成矿系统聚矿功能作出初步排序,具强烈非线性成矿特征的花岗岩浆成矿系统和环流热液成矿系统的聚矿功能最高。

**关键词** 成矿系统结构 系统聚矿功能 标准富集量 系统结构紧致度 成矿系统动力学 非线性成矿

**CLC** P612,N94

矿床学文献中不乏对各类成矿作用聚矿机制及矿床特征的详尽讨论,而对成矿作用间聚矿能力、机制的强弱优劣极少论及。近年,环境对成矿的影响适时地受到关注,但容有过当之处。论者认为成矿作用间聚矿能力无高低之分,只要环境有利都能形成巨大矿床。作者以为成矿与一切系统相似,其结构也有由简到繁、由低级到高级以及聚矿功能由弱到强的演化脉络可寻<sup>[1,2]</sup>。相应,各类矿床的堆积数量质量、集中形态、元素类别、富集难度更是千差万别。因此,随成矿系统诞生而赋予的聚矿功能应有本质差异,可能也有必要进行对比。将各类系统(成矿作用)聚矿能力等量齐观或仅从矿石堆积的物理量衡量的观念无助于矿床学理论和勘查事业的发展。为此,尝试从成矿系统结构入手讨论成矿系统间聚矿功能的本质差异。

## 1 成矿系统结构与成矿(系统)动力学

### 1.1 成矿系统的结构要素

成矿系统结构是系统组成要素间相互联结方式、相互作用关系的总和。成矿系统结构要素可分解为矿源场、中介(演化)场和储矿场。矿源场指直接提供矿质或矿源岩发生物理-化学-生物分解为元素迁移作准备的场所。中介场是成矿物质迁移富集的空间。储矿场则是

收稿日期:1998-08-31 修改稿收到日期:1999-01-25

作者简介:李人澍,男,1924年生,高级工程师(教授级),地质学专业,主要从事找矿勘查,区域成矿作用及成矿系统的研究。

矿质沉淀就位的地球物理-化学-生物障。三场的形态规模和空间关系是系统的静态结构。不同系统三场的配置可连续、交错或重合;场空间总体指向可为近水平、垂直或其综合;场间衔接由紧凑到松散;场规模常相差悬殊。表 1 列举了 8 种常见系统结构特征,显示它们之间的重大差异。成矿场结构对聚矿功能有长期宏观控制效应,也通过对成矿动力学的约束对成矿过程的细节施加影响。

## 1.2 系统结构对成矿动力学条件的促进与约束

静态结构徒具解剖学意义,只有从结构制约下矿质在成矿场之间的动力学状态变化入手才能深刻理解结构对聚矿功能的影响。成矿动力学是联接地球动力学与地球化学反应动力学的中介层次<sup>[2]</sup>,它包括:

(1) 驱动系统的动力类型及系统在地球动力场中的位置。一定结构的系统有对应的动力组合。地表的堆积成矿系统 I 的 A 型结构场总体近水平展开(表 1),决定了重力是主要能源;而花岗岩类归属的熔融成矿系统 III 的 C 型结构成矿场的配置由深部向上,岩浆及成矿物质的输运有赖地热、放射热、构造力及岩浆自身热动力所构成的复杂动力组合。因而系统结构大致限定了它所能利用的能源类型、强度、持续性和稳定性;进而影响系统成矿期的长短、聚矿力大小和成矿元素类型数量和富集度。

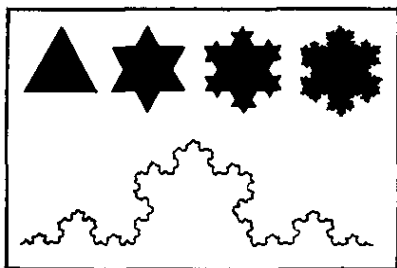


图 1 科克雪花  
(据 J. Gleick, 1990)

Fig.1 Kirk's snowflakes

取边长为 1 的三角形,在每边上加上尺寸为  $1/3$  的等边三角形,按此法操作,在第  $n$  次时,几何体的边长为  $3 \times (4/3)^n$ ,直到无穷大,但面积永远小于初始三角形的外接圆。这意味着一条无限长的线包围着一块有限的面积

(2) 矿质运动的总体方向和轨迹。成矿物质运动总体方向有近水平、垂直、环流或其综合;有单向双向及更复杂的多向聚敛或辐射运动方式。举例来说,地表近水平运动的系统 I 物质在温压变化小的开放空间相对快速移动,与环境的物质能量交换程度偏低,物质重组能力弱化。一般成矿机制偏粗糙,聚矿效能偏低,多形成富集比较小的常量元素矿床。而向上运动系统的物质如岩浆,遭遇多变地球化学体系,环境温压、含水性、 $f(\text{O}_2)$  变化频繁,且易与下降冷水体系混合,造成物质交换沉淀的众多机会。巴尔苏科夫(1990)自掺混分流实验很好地说明了系统物质垂向流动促使矿质分异形成带状矿化的机制。这类系统聚矿机制趋于精细高效,可聚集富集比较大的重金属矿床。

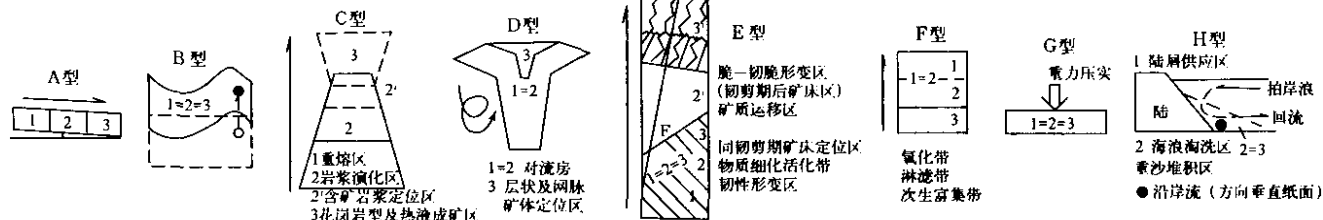
(3) 系统物质运动空间形态及规模。系统空间呈二维延伸(层)型、近等轴(块)型和层-块过渡型等。前者不利于成矿质点的有效接触,降低反应速率和矿质的转化。据作者(1990)在简化条件下的估算,层型空间中任意两质点相遇的概率比块型空间小一个数量级。系统空间规模与矿床规模在同生矿床岩浆矿床中一般正相关,在复杂系统中要具体分析。系统 III 的岩株和 Sedex 赋存的地热系统结构空间都偏小(直径在 0.11~20 km 左右);从而缩短运输距离,节约能源,防止矿质散逸,提高反应速率,其成矿规模反而更大。

(4) 成矿微过程的频度。指同一空间中成矿作用多次发生的机会。一般在沉积成矿中,成矿微层形成后迅即被新沉积物掩埋,与介质隔离,这是堆积结构场广袤及沉积机制所决定的。相反,在 Sedex 所属的系统 V 中,热卤水在同一块岩石中可环流达  $n \times 10^3 \sim 5$  次,反复萃取矿质不断提高矿化度;反过来又提高卤水的萃取能力,具有迭代过程性质,产生与复

表1 成矿系统结构特征对比  
Table 1 Structural characteristics correlation of metallogenic system

结构名称及代号	系统	代表性成员	结构空间			成矿动力学特征					结构物化功能					结构演化度、聚矿力	备注
			形态	规模	紧致度	运动总方向	成矿微过程	主要能源	能源强度及持续性	与环境物能交换	地球化学反应动力学简况	物质紧致度	储量 $Q_0$	标准富集量 $Q$	富集比 $C$	矿石品位	
[A]堆积结构	I	砂矿床、晶质盐类矿体	层型	极大	极小	近水平	一过式	重力能	大,恒稳	小	反应速率远小于搬运速度,难达化学平衡	小	大	小	小	低—中	带[]者为典型结构,不带者为过渡或复合结构
[B]就地改造结构	II	变质-受变质矿床	层-块型	大	小	整体位移大,微观位移小	有渐进累加效应	构造应力、地热	大,持久律动性	能交换>物交换	固态反应为主,速率小	中	大	小—中	小—中	低—中	中
[C]熔融结构	III	亲花岗岩矿床	块型	中—小	大—极大	向上	有时具循环性	岩浆自身动热	大,恒稳	大	反应速率小—大,稳定,彻底	大—极大	小—大	大—极大	中—大	中—富	大
[D]环流结构	V	Sedex VMS	亚块型(磨菇型)	小	极大	环流(及近水平)	典型循环式	岩浆热、异常地热	中—小,恒稳	大	反应速率快,稳定,彻底	极大	中—极大	大—极大	中—大	富—极富	大
E 发展型就地改造结构(1)	IV	与韧性剪切带有关矿床	层带型	中	小	原地及向上	渐进累加式	构造应力	大,脉动性	能交换>>物交换	固态反应阶段慢,后期流体参与反应加快	中—大	中—大	大	中—小	中—富	中
F 发展型就地改造结构(2)		次生富集、风化矿床	不规则块型	小—大	中—大	原地及向下	渐进累加式	化学能、太阳能	中,不稳定	物交换>>能交换	反应速率小,条件苛刻,易中断	大	中—大	中—大	小—大	中—富	中
G 原始就地改造结构	I→II	成岩矿床	层型	大	小	微观无规则运动,略向上	有渐进累加效应	重力、生物化学能	小,持续增加	小—中	反应速率大于A型,伴随固相化向B型过渡	小	中—大	小	小—中	低—中	中
H 原始环流结构	I→V	滨海砂矿床	层型	大—小	中—大	环流加定向迁移	循环式	潮汐能、风能	大,较稳—恒稳	能交换>>物交换		大	中—大	中—大	中—大	富—极富	中

结构图解



说明  
 1为矿源区  
 2为中介演化带  
 3为矿床  
 1=2=3, 1=2 或 3 多场合

利相仿的增殖特征。同一份流体在岩石中的运动路径受水动力梯度、岩石孔隙连通性和热动力场随机变化的非线性影响而变化;其运动轨迹将布满岩石全空间,和岩石的接触面积将趋于无限大,与包围有限二维平面却具有无限长度的科克曲线(图1)和具无穷大表面积而体积趋近于零的门杰海绵<sup>[3]</sup>相似。提示流体环流运动可能出现混沌态,据信后者是形成大一超大矿床的一种机制。而引发这种机制恰恰受系统V结构所制约。

以上前三点具有成矿宏观过程的动力学、运动学和几何学性质,第四点则涉及成矿微观过程,构成了成矿(系统)动力学的完整内涵。它们都由系统结构所派生并制约系统聚矿功能的特征和强度。表1对主要成矿系统动力学各要素作了扼要叙述。

## 2 典型成矿系统结构-聚矿功能分析——兼论系统Ⅲ的非线性成矿特征

堆积成矿系统Ⅰ与熔融成矿系统Ⅲ在诸系统中差异最大,重点加以剖析足以阐明结构与聚矿功能的关系。

### 2.1 堆积成矿系统的结构与聚矿功能

该系统复杂性偏低,以机械沉积矿床为代表。在偏于松散的A型结构动力学条件下,地表成矿物质受重力驱动在广大开放空间中长距离近水平迁移。据里尔曼(1979),地表水流速一般为 $10^5 \sim 8$  m/a,颗粒在水中的沉淀速度为 $10^2 \sim 4$  m/a;而岩石的风化速度为 $0.73 \sim 34 \times 10^3$  kg/(km<sup>2</sup>·a)。故系统Ⅰ的化学反应速率和反应产物成熟度远落后于搬运速度,矿质解离很不彻底<sup>[4]</sup>。加之搬运过程中常有多来源物质掺和,沉积物被迅速掩盖,使沉积物间、沉积物与间隙水间远未达到热力学平衡,总体是一个多相不平衡体系。在成岩环境中固然可稍稍聚集形成结核、鲕粒和显微莓球等形态,由亚稳态向稳态转化;但因受制于渐趋封闭的环境,其物质交换和移动幅度偏小。物质总体水平快速移动虽有利于发生新的化学平衡,然而地表环境变化梯度甚小是其局限性。在地表条件下,系统Ⅰ涉及的化学反应有水解-水合、氧化-还原、溶解-沉淀、碳酸盐化、胶体分散和交代作用,使复杂矿物简单化、轻化,但因其受制于低温条件,总体属于简单化学反应,不利于重元素的解离。

系统Ⅰ的结构空间非常散漫,面积常达 $n \times 10^{2 \sim 4}$  km<sup>2</sup>以上。其矿质-介质运动极易受多变天气系统的随机干扰,水量、流速、流向、沉积物数量及种类随时变化,使沉积成矿微过程缺乏长期的稳定性。矿层水平延伸虽大却难以形成巨厚堆积。这些先天缺陷使系统Ⅰ一般只形成富集比小的常量元素矿床,其矿石储量( $Q_0$ )虽可达 $n \times 10^{8 \sim 10}$  t,但标准富集量( $Q_s$ )( $Q_s$ 是 $Q_0$ 值经成矿难度校正的标准对比单位)却很小(表2)。其产物如铁铝等在国民经济上使用价值很大,但从成矿机制、聚矿功能及成矿演化自然规律的理论角度考查,则系统Ⅰ处于低级状态。把二者混为一谈或者只从前一角度看问题是以往忽视成矿作用间聚矿功能对比的原因之一。

系统Ⅰ其它成员如风化残积矿床、滨海砂矿床、萨布哈矿床及生物化学沉积矿床是向其它高级系统过渡产物或叠加了其它成矿作用,堆积成矿结构-动力学特征已不典型(表1),其结构演化程度有所提高,反映系统内发展的不平衡性。

### 2.2 熔融成矿系统结构及其强非线性聚矿功能

成矿系统Ⅲ的C型结构是物质向上运动,系统空间紧凑的典型。据作者(1997)研究<sup>①</sup>,系统Ⅲ与地球超巨系统自相似程度最高,其成岩成矿物质经历过与地球形成相似的近完全

表2 国外某些超大矿床  $Q_s$  值Table 2  $Q_s$  value of some supper-large ore deposits

矿床名称	主要元素	类型	系统	$Q_s/10^3$	矿床名称	主要元素	类型	系统	$Q_s/10^3$
新喀里多尼亚	Ni	风化残积	I	299	波多西	Sn, Ag	斑岩	Ⅲ <sub>b</sub>	1 470
曼斯菲尔德	Cu	沉积	I	904	宾厄姆	Cu, Mo	斑岩	Ⅲ <sub>b</sub>	4 986
拉布拉多	Fe	沉积变质	Ⅱ	526	基德里克	Cu, Zn, Ag	VMS	V	2 950
库尔斯克	Fe	沉积变质	Ⅱ	1 190	芒特艾萨	Pb, Zn, Ag	Sedex	V	17 460
基鲁那	Fe	岩浆	Ⅲ <sub>a</sub>	486	邦克希尔	Pb, Zn, Ag	复合成因	Sm	5 700
萨德贝里	Ni	岩浆	Ⅲ <sub>a</sub>	850	布罗肯希尔	Pb, Zn, Ag	复合成因	Sm	12 800

说明:① 涉及储量,国内矿床未列;② 为简化,只列  $Q_s$  值;③ 主要资料:参考文献[5~7]及其他,部分内容较旧,但不影响对比;④ 矿床主要类型据资料综合判定

熔融态,并因袭了母体的一些基本特征,为成矿系统中所独有,并具有强烈的非线性成矿特征,有重要对比意义。

### 2.2.1 系统结构对花岗岩浆成矿前提的影响

花岗岩浆演化史,如略去争议甚大的岩浆起源可划为岩浆分凝、侵位、成矿准备、广义亲花岗岩成矿和热演化改造成矿等阶段(层次)<sup>[8]</sup>。高温压岩浆无论从低熔体比( $\varphi$ )或高  $\varphi$  值母体中分凝,从一开始便获得近等轴(倒水滴状)形态,拥有空间紧凑能量集中的先天优越性,有利于侵位。在侵位时不论何种机制(底辟、穹窿或气球膨胀作用),熔体依然保持近等轴状。岩浆是硅氧四面体群聚态组为特征的复杂体系,在侵位期间,其成分结构和含矿性极具可塑性,在多变地球化学环境的选择制约下向有利或不利成矿方向分异。其演化终端产物之一的含矿斑岩常获得岩株状、穹窿状有利形态,进而产生诸系统中少见的固定边界,其半开放性既保障与环境的物质能量交换,又足以抵御环境过大的干扰以完成岩浆的完善分异演化。至侵位结束,一个具有相对稳定初始成分,其演化方向相对可控、演化结果相对可测的岩浆气液成矿分异的过程得以展开。不言而喻,这一成矿前提首先得益于岩浆向上运动和紧凑结构的动力学条件。

花岗岩浆的成矿准备阶段特指岩浆就位前后到大规模成矿之前,与岩浆演化伴生、与环境相互作用所产生而有利成矿的物质状态转化、容矿空间的开辟和构造态势的形成等相关联的事件。它包括岩浆就位后的分异、碱交代作用及岩体内外热致裂、水力致裂和构造-冷缩成因裂隙网络的形成。前者是岩浆在边界保护下缓慢冷却过程中的完善岩浆-气液-成矿分异。在花岗岩体深部开始的碱交代作用是岩石中“不清洁”矿物中微量元素活化迁移的重要成矿物质准备。岩体中裂隙网络主要是岩浆结晶过程中水过饱和出现二次沸腾导致岩体膨胀的结果。据 Norris; Henley(1997),孤立孔隙流体与周围矿物差异膨胀也是原因之一。Koide(1975)对椭球状岩浆体模拟计算的裂隙分布模式与自然界状况大体一致。成矿准备之有无和完善程度直接影响系统Ⅲ功能的发挥。岩浆成矿条件原本十分苛刻,而花岗岩株

① 李人潜,主要成矿系统非线性过程分析——探索成矿预测新途径研究之一(内部科研报告),1997

边界内相对独立而不孤立的岩浆体系得以有效保存,拥有高能量又得以从容衰减为成矿所利用以及多重裂隙有机会相互叠加,为造就巨大矿石堆积创造前提都由系统良好的结构动力学条件所赐。

### 2.2.2 系统Ⅲ结构对聚矿功能的影响

良好成矿准备将导致以下结果。第一,含矿岩浆气液分异产物在岩株裂隙网络中以极大的密集度在岩体顶部及上方,大致以倒截锥形空间中卸载(图2),因袭岩株的块型紧凑格

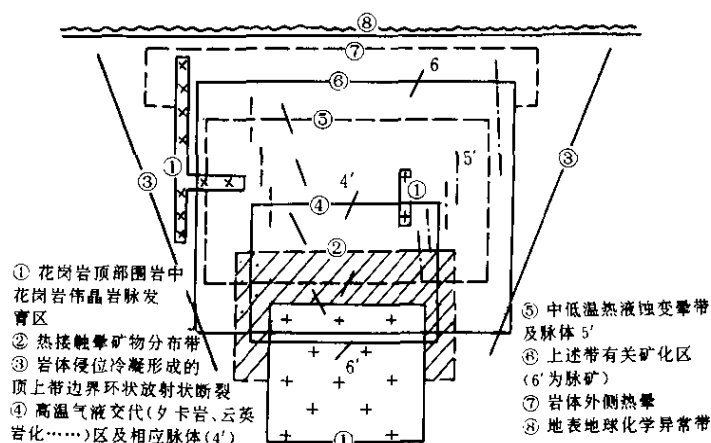


图2 系统Ⅲ<sub>b</sub> 紧密储矿场图解

(引自袁奎荣,1990,简化)

Fig.2 Compact ore-localization field diagram of system III<sub>b</sub>

局。世界许多大矿床都具有这种形态,金堆城钼矿、南泥湖钼钨矿床可以为证。其次,岩株体

侵入的软弱带成为不同期次岩浆侵入成矿的通道,造成紧密叠加的矿化系统。美国 Climax

钼矿床是典型矿例。第三,花岗岩体中含矿性高的近低熔部分的反复重熔,富硅碱超酸新生岩浆的含矿性将以滚雪球方式递增形成富大矿床,如柿竹园钨锡铋钼矿床多种元素都达到大型规模。第四,铀钍钾富集于富硅碱的酸性花岗岩穹隆的顶部及接触带<sup>[9]</sup>,成为产高热(HHP)花岗岩类,在热演化进程中改造既成矿岩或提供其它系统(如 Sedex)成矿热源。

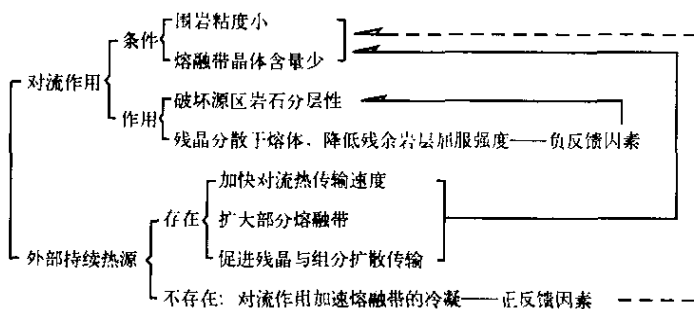


图3 分凝作用因素自反馈图解

Fig.3 Self-feedback diagram of magma segregation factors

实线代表负反馈;虚线代表正反馈

构成系统Ⅲ强大恒久的第二成矿力<sup>[2]</sup>。越来越多的矿床如小秦岭金矿带、陕西八卦庙金矿床、苏必利尔金矿带、芒特艾萨铅锌矿床、东坪金矿床等被认为其形成与花岗岩热演化改造有关<sup>[10]</sup>。以上4点是系统Ⅲ结构-动力学条件促进聚矿功能的有力论据。

### 2.2.3 花岗岩浆非线性聚矿功能的结构-动力学依据

系统Ⅲ强大聚矿功能的深层次原因在于成矿过程中的强非线性特征。系统Ⅲ是最复杂的多层次系统之一。层次间、层次内诸因素间都有一因多果、一果多因和因果交叉反馈的非线性相互作用。岩浆顺利分凝是后续成矿的第一个关口。以熔体比  $\varphi > 0.3$  时为例(图3), 熔体的对流(因1)破坏源区岩石残留分层结构(果1), 使其屈服强度降低(果2), 而果2又有利于熔体对残余层的进一步破坏。此时果2以维持系统稳定的负反馈形式反作用于因1, 促使系统向扩大  $\varphi$  值增加熔浆活动性方向发展。如源区缺乏外部热源, 则因1导致熔融

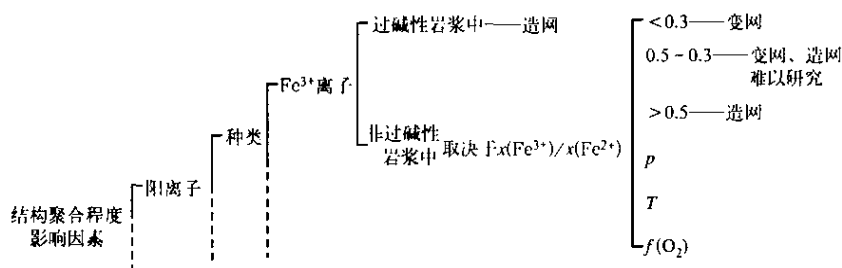


图4 影响花岗岩浆粘度因素链

Fig.4 Factor-chain determining the viscosity of granitic magma

带冷却, 反而抑制对流作用的破坏能力, 妨碍分凝顺利发展成为正反馈因素。适当粘度是岩

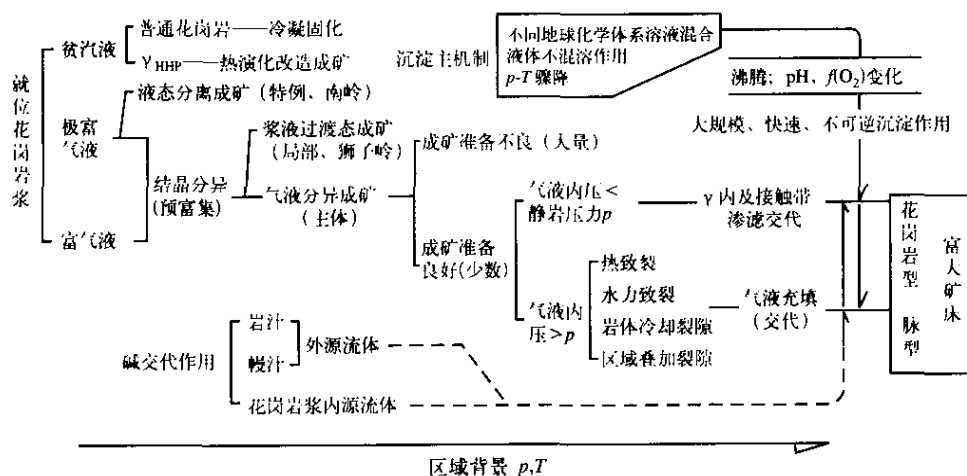


图5 花岗岩浆成矿路径图

Fig.5 Metallogenic path of granitic magma

粗线代表主要路径; 双线代表重要、少见; 细线代表次要

浆分异成矿的另一关键。影响岩浆粘度至少有6个层次因素集(图4)。在层次间、因素间存在着极其复杂的非线性相互作用, 使其总结果难以预测。单以第三层次中的一个因素  $\text{Fe}^{3+}$  离子起造网(增粘)或变网(降粘)作用而论, 除受共存阳离子种类数量和环境  $p, T, f(\text{O}_2)$  诸因素非线性综合影响外, 还取决于  $x(\text{Fe}^{3+})/x(\text{Fe}^{2+})$  比值, 但又不与其线性相关<sup>[11]</sup>。在岩浆得以顺利侵位后, 成矿路径依然十分曲折, 成矿前途未卜, 往往要通过一长串演化分岔点。为简化, 从含矿岩浆就位分支开始讨论(图5)。岩浆只有连续通过富气液分

支进入良好气液分支和成矿准备良好分支才能到达成矿目的点。如果是 HHP 花岗岩且热改造成矿条件具备时才可能实现附加成矿。花岗岩浆成矿史又是系统与环境物质交换史, 它表现为岩浆分异与环境物质的掺和。理想成矿过程至少经历了 3 次分异与两次掺和(图 6)。第一次重要分异产生初始熔浆团, 岩浆体诞生; 第一轮掺和壮大岩浆, 但成矿前景难以

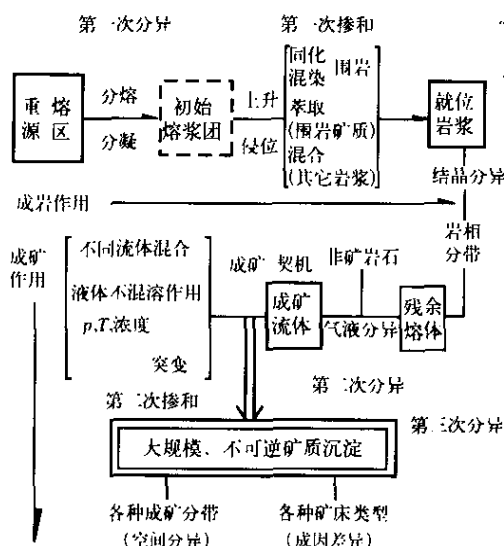


图 6 花岗岩浆成矿物质分-合图解

Fig.6 Differentiation-mixing process of ore-forming materials in granitic magma

预测; 第二次重要分异产生含矿岩浆及成矿流体, 系统向成矿方向转化; 第二次掺和出现成矿契机, 也可能导致成矿流体稀释散逸; 第三次分异才造就成矿系统。这一多次分合能否进行到底取决于岩浆与环境因素有利的非线性组合。

自然界是吝啬的, 岩浆顺利通过一系列分岔点的选择, 完成几个分合过程的总概率非常小。据统计, 华南花岗岩成矿岩体不过百分之一二, 成大矿者更小。而系统Ⅲ能在苛刻条件下把丰度极小的微量成矿元素聚集为大-超大型矿床, 在  $Q_0$ ,  $Q_s$  值上有惊人的表现(表 2), 除了岩浆自身的禀赋优越外, 还应归因于优良的结构动力学性能, 多少能适应强烈非线性过程的选择获得成矿的机会。首先, 岩浆具有强大凝聚力得以形成紧凑的近等轴状系统空间和半开放的系统边界, 使岩浆组分得以充分接触加速化学反应, 又得以缓慢降温实现完善的岩

浆-成矿分异。其次, 在系统边界内水-热-矿源基本具备, 毋需环境长途输运供应, 从而减少成矿环节, 缩短成矿路径提高聚矿效能, 形成极少见的自足成矿系统。第三, 岩浆动-热熔融体具有强大能量, 在环境能量支持下上升侵位并与环境物质进行交换, 获得丰富矿质的机会。庞大岩浆复杂体系又足以缓冲地球化学环境的干扰, 保持岩浆成分的相对稳定。

以上对系统Ⅰ, Ⅲ的分析足以阐明结构与聚矿功能的关系, 其它系统问题自可迎刃而解。扼要地说, 呈蘑菇状紧凑空间的系统Ⅴ以成矿物质的环流运动及由此而派生的迭代性成矿微过程为特色, 其聚矿功能与系统Ⅲ相伯仲。以层-块状巨大系统空间和成矿物质就地物理改造为特色的系统Ⅱ, 其成矿特征、聚矿功能和演化程度居于系统Ⅰ与Ⅲ, Ⅴ之间。动力改造成矿系统Ⅳ的结构-动力学条件、聚矿功能尚待进一步研究, 其演化位置待定。这些系统详情参见表 1, 2。成矿系统按其聚矿功能和演化程度大体构成以下序列:

? ...Ⅳ...?

Ⅰ—Ⅱ—Ⅲ, Ⅴ—Sm(复合成矿系统)

总体而言, 成矿系统具有结构紧致化、动力学条件优化和聚矿功能增高的演化趋势。

### 3 聚矿功能量化评估方法探索

#### 3.1 系统结构-聚矿功能评估的基本思路

理论上衡量系统功能的效应指数( $\alpha$ )( $\alpha = (A - A_0)/A$ ,  $A_0$  是加和性系统功能,  $A$  是非



加和性系统功能)对多层次复杂成矿系统不适用。据系统论原理,系统功能是结构的外部表现,结构的完善程度可用系统的有序度表达;原则上系统的有序度又与系统的对称性负相关<sup>[12]</sup>。伴随系统对称性的降低,有序度相应增长,反之亦然。因此,运用系统对称性—有序度—结构—聚矿功能这一系列概念的关联与转化,便可形成对成矿系统结构—功能定性分析的基本思路。它立足于传统地质学又有现代系统科学依据。可通过几个系统对比加以说明。太古代火山岩浆面状喷溢的弥漫状弱矿化具有近各向同性的高度对称性,其有序度极低,既无结构可言,也不存在有意义的聚矿作用。元古代火山槽地中在沉积分选作用参与下出现层状火山沉积矿化,具粗糙的堆积结构,系统对称性有所降低,呈现初级的聚矿功能。元古代至中生代系统 V 分化出矿源、动力、萃取、排泄等多个有机联系又非规则排列的子系统,表现出明显的对称破缺却显示出高度有序的运行状态,使成矿微过程持续反复进行,貌似堆积结构,系统已跃升到聚矿效能的高峰。前文系统结构功能对比便遵循了这种思路。为使其易于操作宜辅以量化评估手段。

### 3.2 聚矿功能物化指标的探索

据作者调研<sup>①</sup>,复杂非线性成矿系统是偏黑的灰箱系统,成矿过程量化及数学模拟难度极大。有效策略以宏观过程定性分析入手辅以半定量研究,适当探索简单过程的数学模拟为宜。鉴于成矿系统时空跨度及矿床特征变化极大,单从一般地质特征入手难以找到普适性的聚矿功能指标。只有超越表象,辨认贯穿系统聚矿过程的共同因素,亦即“深层结构信息”<sup>[13]</sup>(魏耳,1935)跨系统跨类型的聚矿功能对比才有可能。作为成矿系统输出的矿石储量品位和矿体形态便具有这种性质,是近黑箱系统功能现实的量化指标。天文学利用天体红移与光度星等作出的赫罗图有效地研究天体分类及演化可为佐证。迄今,全球详勘矿床覆盖了各种矿床类型、成矿区和成矿系统。如将矿床类型纳入统一的分类体系,便可采用适当指标处理数据,获得任一成矿区不同类型、系统聚矿功能的量化概念。

作为首选,矿床储量  $Q_0$  值可作为系统功能物化输出的衡量指标。然而  $Q_0$  值缺乏可比性。第一,不同矿床富集的元素丰度相差悬殊,浓集到矿床最低平均品位的富集比( $C$ )相差 6~7 个数量级;如按实际品位则可达 10 个数量级以上。一般  $C$  值大小与成矿富集过程长短、难易及能耗正相关。显然铁铝等常量元素的富集过程比钨锡等微量元素要简单得多,成矿概率大得多。故  $C$  值浓缩了矿床形成过程的大量信息,可视作成矿难度系数。其次,不同矿床  $Q_0$  值相差达 10 个数量级以上,从  $n \times 10^8 \sim 10^{10}$  (Fe) 到  $n \times 10^0 \sim 10^2$  (Au),它正是成矿难度不同的必然结果。为此,提出对  $Q_0$  值进行成矿难度校正的标准富集量( $Q_s$ )概念:

$$Q_s = \sum_{i=1}^n C^i \sqrt{Q_0^i}$$

式中: $n$  为矿床成矿元素数; $C^i$  是第  $i$  个元素的富集比; $Q_0^i$  是第  $i$  个元素的金属储量; $C^i$  值为第  $i$  个元素平均品位与该元素地壳丰度值之比。为避免  $Q_s$  值过大, $Q_0$  取其平方根。为检验  $Q_s$  指标的适用性,选用陕西 30 个中—大型矿床,国内外 58 个大—超大型矿床和 D.P.Cox(1986)据 3 900 个矿床归纳的 89 个矿床模式等 3 批数据,并将矿床数据纳入成矿系统进行处理,作出  $Q_s$ -系统图(图 7)。图中 I—II—III<sub>a</sub>—III<sub>b</sub>—V—Sm 序列(III<sub>b</sub> 是富气液熔融成矿亚系统,III<sub>a</sub> 是贫气液亚系统),是按成矿系统结构及系统演化程度研究成果排

① 李人潜,现代综合新学科新成就与成矿研究成矿预测现状调研报告(内部),1996

定的,作为  $Q_s$  试验之参照。图 7 显示陕西矿床  $Q_s$  曲线与 I—Sm 序列基本一致,即  $Q_s$  值

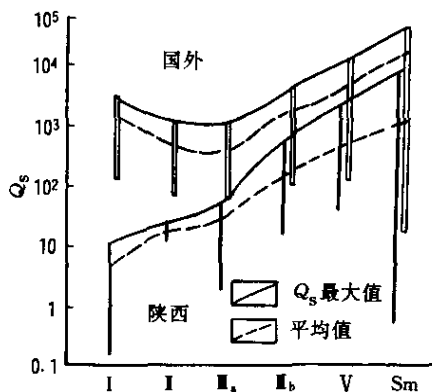


图 7  $Q_s$  与成矿系统关系图

Fig.7 Correlation map of  $Q_s$  and metallogenic system

与成矿系统的演化趋势和结构完善程度共消长。而以国外矿床为主体的曲线中系统 I—II 段则  $Q_s$  值呈下降趋势且系统 I、II 的  $Q_s$  值都大于系统 III<sub>a</sub>, 可能反映了地区差异,也可能由于国外文献中常把归属于系统 V 的喷流热液矿床定为沉积或沉积变质矿床<sup>[14]</sup>,故抬高了系统 I、II 的  $Q_s$  平均值,造成了曲线畸变。相信统一校订矿床类型后,两图可能趋于一致。

应指出,  $Q_s$ -系统图显示不同地区不同人的数据所综合出来的  $Q_s$  序列具有明显的规律性且与定性分析得出的成矿系统结构-聚矿功能演化序列基本吻合,说明  $Q_s$  指标有反映客观实际的能力,是信息量丰富又有针对性的一种量化指标,可用于系统聚矿功能对比。

### 3.3 成矿系统结构紧致度评估

根据前文对系统结构-功能定性分析,可引入系统结构紧致度概念,它包含结构场衔接的紧密程度、系统空间的集中程度、成矿微过程的频度和成矿作用的叠加程度。它是系统凝聚力和能量物质集中程度的反映<sup>[15,16]</sup>。这 4 条应作为整体考虑。以第一条而论,简单的三场合一而其它条件甚差则聚矿功能也不高,如 B 型结构(表 1)。只有像 D 型环流结构场的重叠兼有紧凑偏小的系统空间以及热卤水环流萃取微过程的长期反复共同作用,才能稳定维持水动力梯度,缩短流体输运途径,节约能源,强化聚矿机制,这才是真正的紧致结构。

结构紧致度(I)可用系统外轮廓球体化率、矿体中单位矿块对矿体几何中心距离的离散度等四种指标评估,其中以第一种最实用。球形是自然界物体演化理想形态之一,近等轴状成矿系统聚矿功能也最强。系统空间球体化率可定义为系统空间外轮廓与等体积球体空间重合率的极大值。作为简化计算,利用矿床与系统自相似原理,将矿床外轮廓三维尺寸( $a, b, c$ )化简为  $a', b', 1$ , 此时球体化率  $I_1 = 1/a'b'$ 。作者利用国内外 40 个大型矿床计算  $I_1$  值并按系统平均,得出:系统 I 为  $5.75 \times 10^{-6}$ , 系统 II 为  $1.78 \times 10^{-4}$ , 系统 III 为  $5.32 \times 10^{-2}$ , 系统 V 为  $1.69 \times 10^{-3}$ ;说明系统 III 紧致度最高, V 次之,系统 II 又次之,系统 I 最低。形象地说,紧致化系统是天然小型化高效节能造矿工厂。

可以认为  $Q_s$ -I 指标体系能充当系统聚矿功能评估的辅助量化手段,初步满足地质科学数学化时代到来之前过渡阶段的需要。

地球科学正面临学科间交叉渗透的新时代,成矿研究的成败关键之一在于能否从系统科学新视点和大地质学高度拓展新思路,在立足传统矿床学基本事实规律的同时能否超越它的局限性。其次,在宏观定性研究基础上,探索反映矿床深层次的共有特征,如标准富集量之类的信息和量化指标,聚矿功能对比才能进入实践。第三,充分利用地球动力学和地球化学反应动力学的成果,着重探索成矿动力学这一未被充分重视的中介层次所揭示的因素对成矿系统结构功能的促进和制约。成矿系统结构聚矿功能对比分析是地球科学深化形势下的新课题。具有理论和实践意义,极富挑战性和成果性。相信在矿床学界的关注下,在不远的将来会取得突破性进展,使认识臻于成熟。

## 参 考 文 献

- 1 翟裕生, 地史中成矿演化的趋势和阶段性, 地学前缘, 1997(4): 107~108
- 2 李人澍, 成矿系统分析的理论与实践, 北京: 地质出版社, 1996. 122~124, 20~27, 73~76
- 3 Gleick J. 混沌开创新学科, 上海: 上海译文出版社, 1990. 106~109
- 4 赵伦山, 张本仁, 地球化学, 北京: 地质出版社, 1988. 302~303
- 5 沈承珩, 王守伦, 陈森煌, 等, 世界黑色金属矿产资源, 北京: 地质出版社, 1995. 46~49, 63~65
- 6 狄克逊·J. 国外矿床图册, 冯钟燕等译, 北京: 北京大学出版社, 1992. 200~203, 287~291
- 7 北京矿产地质研究所主编, 国外主要有色金属矿产, 北京: 冶金工业出版社, 1987. 100~105, 256, 308, 424~426
- 8 李人澍, 花岗岩浆宏观过程非线性分析, 矿床地质, 1998(增刊): 571~574
- 9 刘英俊, 曾励明, 李兆麟, 等, 元素地球化学, 北京: 科学出版社, 1984. 220~223
- 10 张德全, 关于成矿流体地球化学研究的几个问题, 地质地球化学, 1997(3): 73
- 11 莫宣学, 岩浆熔体结构研究, 见: 当代地质科学前沿, 北京: 中国地质大学出版社, 1993. 270~273
- 12 李红刚, 关于系统结构及其演化问题的讨论, 自然辩证法研究, 1994(9): 56
- 13 陶伯华, 朱亚燕, 灵感学引论, 沈阳: 辽宁人民出版社, 1987. 150~154
- 14 涂光炽著, 中国层控矿床地球化学, 第三卷, 北京: 科学出版社, 1988. 1~258
- 15 李人澍, 成矿系统结构集约度及其在矿床研究中的意义, 见: 第五届全国矿床会议论文集, 北京: 地质出版社, 1996. 71
- 16 Li Renshu, On metallogenic system network and system structure, 30th IGC Abstracts, 1996, 1: 512

## SYSTEM STRUCTURE AND ORE-FORMING FUNCTION

Li Renshu     Zhu Huaping

(Northwest Non-ferrous Geological Institute, Xi'an, 710054)

**Abstract** The Metallogenic system structure may influence greatly the ore-forming function by controlling over the metallogenic dynamic conditions, namely: the kinds of energy to start and to maintain the system processes; the general moving direction of ore-forming materials; morphology and size of system space, and finally the repetitiveness of the metallogenic microprocess in unit system. Qualitative system-structure analysis indicates that the intensity of metallogenic function of a system is positively correlated with the perfectness of system structure and the superiority of metallogenic dynamic conditions. A perfect structure means a compact structure that is measured by the compactness of system structure ( $I$ ), while the ore-forming function is characterized by the standardized reserve ( $Q_s$ ) transformed from the ore reserve ( $Q_0$ ) with the metallogenic difficulty coefficients. After the qualitative-quantitative correlation, a sequential comparison of the ore-forming intensity of basic system structures has been made and the system III<sub>b</sub> and V, distinguished for their strong non-linear metallogeny, are considered as the outstanding members in ore-forming of the mega-system.

**Key words** metallogenic structure, ore-forming function of system, compactness of system structure, standardized reserve, metallogenic dynamics, non-linear metallogeny