论成矿系统

翟裕生

(中国地质大学,北京,100083)

摘　要　成矿系统是当今矿床学研究的一个重要课题,是矿床学向系统化、全球化方向发展的一种趋势。成矿系统是指在一定地质时-空域中,控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿作用过程,以及所形成的矿床系列和异常系列构成的整体,它是具有成矿功能的一个自然系统。成矿系统是在一般矿床成因研究的基础上,着重从宏观上,从成矿的时间、空间、物质、运动的有机结合上,探讨区域尺度的成矿规律。其研究意义是深入认识成矿动力学机制,指导矿产勘查,并有利于将成矿学信息应用到地学其它学科中去。文中还论述了成矿系统与成矿系列、成矿区带的联系和区别,对成矿系统的基本要素、作用过程、作用产物和成矿后变化及保存 4 个问题作了说明。提出以成矿的构造动力体制作为划分成矿系统大类的依据及以成矿机理作为划分成矿系统类型的主要标志。最后以古大陆边缘构造-成矿系统为例,说明构造动力型式、构造组合与成矿系统之间的内在联系。

关键词　成矿系统　定义　结构　作用过程　保存　分类　成矿系列　成矿区(带)

CLC　P61

1　成矿系统是矿床学研究的一个趋向

面临世纪之交,地球科学研究正出现两个趋势:一是朝着系统化、信息化和全球化的方向发展;二是更广泛地渗入和影响社会经济发展和人民生活,为实现可持续发展发挥重要作用。作为地球科学分支之一的矿床学因其研究对象是矿产资源的形成和分布规律,因在资源保证供应中发挥作用而继续得到重视,并也在向系统化和全球化发展。近年来成矿系统概念的提出并引起人们的关注,就体现了矿床学发展的一种趋势。

系统科学方法将自然界和社会中的各种事物看作是多个系统。每一系统是由若干相互联系和相互作用的要素组成的、具有特定功能的统一整体。在矿床学研究中,矿床是一种具有应用价值的地质体,成矿作用及有关事物被认为是一个复杂的自然系统。成矿系统(metallogenic system, ore-forming system, mineralizing system)一词自 70 年代初见于地质文献[1],反映了人们试图运用系统观念研究成矿学的趋势。在我国自 1978 年以来深入探索而且相当普及的成矿系列研究也属于这一方面的重要进展(程裕淇等[2],翟裕生等[3])。於崇

收稿日期:1998-11-18　修改稿收到日期:1998-12-28
作者简介:翟裕生,男,1930 年生,教授,博士生导师,矿床学专业。现任国际矿床成因学会矿田构造组主席。
本研究受原地质矿产部重点基础研究项目(编号:9501107)、国家科技攀登计划项目(编号:95-预-39 和 95-预-25)联合资助。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

文[4]、李人澍[5]等曾论述过成矿系统的研究内容和方法。

矿床及其形成作用是岩石圈系统的一个组成部分和一种运动(作用)形式。要深入研究矿床的形成和分布规律,一方面要加强研究成矿的地质构造背景,尤其是深部地质背景,包括壳幔作用对成矿的控制,另一方面,则要研究成矿系统本身,包括成矿要素、成矿作用动力学过程和成矿演化。这两个侧面的有机结合研究,将是深入研究成矿理论的一个重要途径,也是矿床学研究备受瞩目的前沿领域之一。笔者曾对成矿系列有较长时期的探索[6~10],近年来又在科研中进一步运用成矿系统观念分析问题[11~13],获得一些初步认识,现提出供研讨。本文限于篇幅,主要对内生成矿系统进行讨论,着重探讨两方面的问题:一是对成矿系统观念及其基本内容的思考,二是成矿系统观念在矿产勘查中的实际运用。

2　成矿系统的定义、结构和特性

2.1　成矿系统的定义

什么是成矿系统?在 1979 年版的英文地质辞典中没有这个术语,在俄文地质辞典(1973,卷 2)[1]中,成矿系统被解释为"由成矿物质来源、运移通道和矿化堆积场所组成的一个自然系统"。

以后,M·П·马祖洛夫(1985)[14]提出:"成矿系统是导致矿床形成的地质体、地质现象和地质作用的总和。"

В·И·森雅克夫(1986)[14]认为:"成矿系统是下列因素的总和:能量和物质的来源、搬运介质、矿质运移的机理和通道、矿石堆积场以及矿石堆积作用,这些因素的相互作用导致矿床形成。"

Б·М·契克夫(1987)[14]指出:"成矿系统是在一定空间(现在的或地质历史时期的)导致成矿物质高度浓集的构造-物质因素和流体因素相互作用的总和。"

上述俄罗斯学者对成矿系统的定义是大同小异的,他们比较强调两个方面,一是矿源、运移和矿石堆积的作用过程,二是强调构造、物质、能量、流体等控矿因素及其相互联系。这两个方面都是成矿系统的基本内容。

西方文献中对成矿系统一词或类似名词常有运用,但很少见到对成矿系统的定义。澳大利亚的 A·L·贾奎斯(1994)[15]提出:"成矿系统可定义为控制矿床的形成和保存的全部地质要素,着重在以下作用:成矿物质从源区的活化、运移,并以高度富集的形式堆积,以及在以后地质历史中将它们保存下来的作用。"这一定义增加了将矿床保存下来的作用,体现了历史演化的思路,对找矿有实际意义。

在我国,於崇文(1994, 1998)[4,16]从复杂性科学的角度,探讨成矿动力系统的自组织临界性,他提出:"成矿系统是一个多组成耦合和多过程耦合的动力学系统,多组成包括'多组分'和'多个体'的双重涵义。许多成矿作用又是两种或两种以上过程耦合的多重耦合过程。""成矿系统总体上是远离平衡、时-空延展的复杂耗散系统。"於崇文从成矿作用动力学的深度来分析成矿系统的形成过程和机理,对从本质上探讨和认识成矿规律有指导意义。

李人澍(1996)[5]认为:"成矿系统可以定义为特定时空域中从矿源生成到矿质定位全过程所形成的工业与非工业矿化,与矿体生成有联系的中间产物,反映成矿作用的各种指示物,以及卷入成矿系统空间的自然体系的总和。"李人澍在成矿系统的内涵中强调了非工业

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

矿化以及反映成矿作用的各种指示物。工业矿化与非工业矿化是相对的,二者并提体现了作者的一个整体的思路。

翟裕生(1998)提出:"成矿系统是在一定时-空域中由控制成矿诸要素结合成的、具有成矿功能的统一整体。它包括成矿物质由分散到富集的制约因素、作用过程及各种地质矿化产物[12,13]。"在本文中,又针对成矿系统的特殊性,即成矿作用过程的有关信息被保存在现存矿床及有关地质异常中的特点,补充了矿床形成后保存作用的内容,将成矿系统定义为"成矿系统是指在一定的时-空域中,控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿作用动力过程,以及所形成的矿床系列、异常系列构成的整体,是具有成矿功能的一个自然系统"。

由上述可见,成矿系统概念中包括了控矿要素、成矿作用过程、形成的矿床系列和异常系列,以及成矿后变化和保存等 4 方面基本内容,体现了矿床形成有关的物质、运动、时间、空间、形成、演化的统一性、整体性和历史观。

2.2　成矿系统的结构

成矿系统是由相互作用和相互依存的若干部分(要素)结合成的有机整体。系统中各要素间的相互关联和相互作用即成矿系统的结构。科学地分析一个成矿系统的结构有着重要

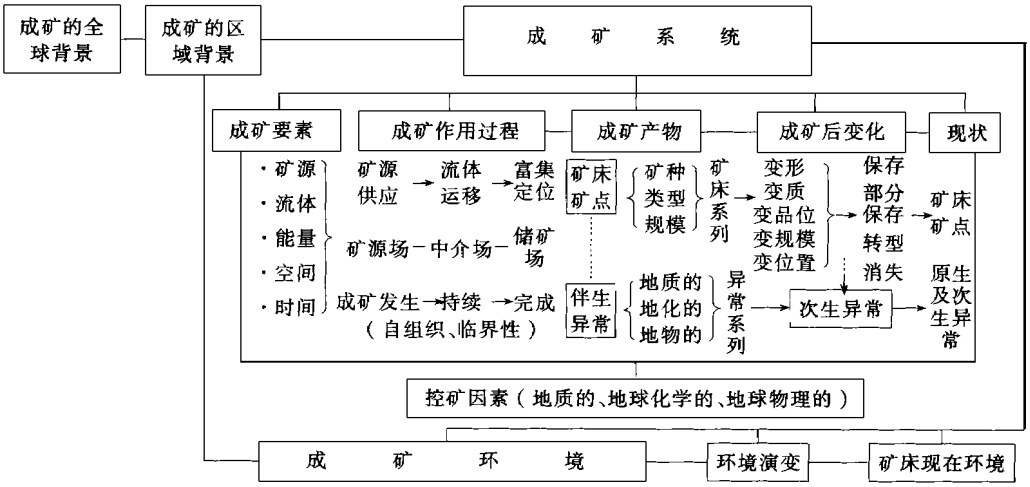


图 1　成矿系统结构图

Fig. 1　Texture diagram of metallogenic system

的理论和实际意义。概括地说,一个成矿系统的内部结构一般包括 4 个部分:①控制成矿因素:有风化、沉积、构造、岩浆、变质、流体、生物、大气、地貌、热动力等作用因素;②成矿要素:有矿源、流体、能量、空间、时间等;③成矿作用过程:包括成矿发生、持续、终结以及成矿后的变化和保存等;④成矿产物包括矿床系列和异常系列。成矿系统基本结构可表示如图 1。

2.3　成矿系统的特性

成矿系统研究是在对一般矿床成因研究的基础上进行的,与局部的矿床成因研究不同,它是从成矿的时间、空间、物质、运动与区域构造背景的结合上,着重探讨区域尺度的成矿规律。成矿系统的一些特性可概括为:①它是地史演化的自然产物,是地球物质系统的一个组成部分;②是产在一定地质构造环境中的开放系统,与所在环境之间进行着成岩成矿物质、流体和能量的交换,以达到成矿物质的高度浓集;③具有非线性反馈的动力学机制和自组织

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

能力 ,从而能自发排除作用过程中的各种干扰 ,保持成矿作用的持续进行 ,实现其成矿功能 ; ④成矿系统具有层次性 ,全球性的有超成矿系统 ,基本的是区域成矿系统。本文讨论的主要是区域成矿系统 ; ⑤成矿系统具有一定的时空范畴。在时间上一个成矿系统从产生、发展到消亡 ,一般需要 10^4～10^6a ;在空间上 ,一个成矿系统可占地几千甚至上万 km^2 ,大体相当于成矿带的范围 ; ⑥成矿系统具有四维属性 ,它是动态的。它的内部结构、组成和与外部环境的相互作用 ,都随时间而变化(或显著 ,或轻微 ;或突变 ,或渐变) ; ⑦成矿系统在时间和空间上的分布是不均匀的。在地质历史上 ,成矿系统的演化是不可逆的。成矿系统的类型、数量随时间而增长并有复杂化的趋势 ,例如 ,在前寒武纪的控矿因素和矿床类型比较简单 ,而显生宙的控矿因素和矿床类型明显增加 ,如普遍而强烈的生物成矿作用和风化成矿作用等。

3　成矿系统的研究意义

成矿系统的研究意义可概括为 3 个方面 :

(1) 推动成矿规律的深入研究　成矿系统分析从事物的联系性和整体性出发 ,将复杂万千的成矿作用以系统思路贯穿起来 ,将成矿的环境、背景、要素、作用、过程、动力、产物、异常和演变等作为一个自然作用整体加以研究 ,这有利于全面认识成矿动力学机制、矿床形成演变历史过程和矿床的时空分布规律 ,从而推动矿床学研究进一步从现象到机理 ,从静态到动态 ,从定性到定量 ,从局部到整体 ,因而是提高矿床学科学水平的一个重要途径。

(2) 有利于发挥矿床学对整个地球科学的功能　成矿系统不是孤立的 ,它是整个地球系统的一个组成部分 ,其特定功能是成矿物质的高度浓集。这种浓集显示了自然作用的神奇 ,高度成熟的有机质集中在人体大脑中使人类成了万物之灵 ,而金属、非金属元素的高度富集产生有用性质而变成了贵重的宝藏。可以认为 ,成矿系统的发生、演变到终结是更大尺度、更高层次的地质系统(地球系统、岩石圈系统、地壳系统等)的直接或间接控制的结果。每一个成矿系统都发生在一定地质时代和特定的地质环境 ,因而 ,在一定程度上可以起到“化石”“地质记录”的作用 ,可以将某类矿床或成矿系统的出现作为当时的地质环境特征和地质事件性质的“指示剂”。例如 ,南非古元古宙含金-铀砾岩矿石中碎屑状黄铁矿的出现可以作为当时大气圈中缺氧的证据。又如 ,Sedex 型矿床的发育说明成矿时当地处在拉张构造环境(裂谷、裂陷槽等) 。但在过去 ,非常丰富的有关矿床和成矿作用的信息和观点多只限于应用在找矿勘探和矿山地质工作 ,而忽视了将这些有用信息应用到地学的其它分支学科的研究中去 ,也即忽视了成矿系统与其它地质系统(如构造、沉积、变质、大气、流体) 的联系和相互影响。这对于整个地球科学的发展是不利的。相信由于矿床学家和其它学科专家的共同努力 ,上述现象将能有所改变。而加强成矿系统研究有助于辩证认识成矿系统与其它地质系统的关系 ,有利于矿床学和其它学科的互相影响、渗透和促进。

(3) 全面指导矿产的勘查和开发　研究成矿系统的实用意义在于全面、有效地指导矿产勘查工作 ,提高成矿预测的精度。建立了成矿系统的概念 ,认识了某一个成矿系统的全局 ,对于可能产生在这个系统中的有关矿床类型、矿床形成过程和控矿因素等有一个整体的观念 ,这对于找矿勘探工作可以起到举一反三、由此及彼、驾驭全局的作用。

以大象为例 ,如果将大象全身比作一个矿床组合或矿床系列 ,则认识其全身结构 ,可了解矿床组合的全貌。而成矿系统不只研究矿床组合 ,还包括成矿环境、控矿因素和矿化异常

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

等内容。犹如不仅研究大象的全身结构,还要了解象的生理机能、生命过程、活动迹象(粪便、气味、足迹、活动路径和范围……)以及象群的生活环境和活动规律,进一步还要研究它们所以生活在这个环境的原因。有了类似的整体思路再去找矿,视野就比较开阔,信息就更加丰富,找矿方向就容易明确,找矿路子就比较宽广,因而找矿就较易获得成效。

有关成矿系统的规律性认识不只对找矿有用,对于区域资源潜力评估和区域经济发展规划以及改善矿业环境等都有参考价值。

4 成矿系统、成矿系列、成矿区带的联系与区别

4.1 成矿系统与成矿系列

(1) 从研究对象看,二者从不同角度研究问题。成矿系列(或称矿床成矿系列、矿床组合)主要从矿床类型组合的角度去研究相关矿床之间的联系。程裕淇(1993)[17]提出:"矿床成矿系列是在一定地质时期和一定地质环境中,在一定的主导地质成矿作用下形成的,时间、空间和成因上有密切联系,但其具体生成条件有差别的一组(两个以上)矿床类型的组合。"陈毓川等(1993)[18]指出"成矿系列是具有成因联系的矿床所组成的自然体",是"四维空间中有内在联系的矿床组合"。翟裕生等(1987)[6]强调矿床形成与岩石建造的联系,提出"成矿系列是与同一建造有成因联系的各种成因类型矿床构成的四维整体"。因此,从定义本身看,成矿系列的研究对象是有成因联系的矿床类型组合。

从前述成矿系统的定义看,成矿系统是由矿质来源、控矿因素、成矿过程、成矿产物(矿床组合及有关异常)和成矿后改造保存等一系列要素组成的一个自然作用体系。因此,从研究对象看,成矿系统应能包括成矿系列,或至少成矿系统有更广阔的研究对象。

(2) 在研究内容上,从已发表的有关成矿系列的文献看,成矿系列着重研究成矿区带中一个主导地质作用形成的诸矿床(类型)之间时、空、成因联系,着重对事实的概括、总结和分析。而成矿系统则主要从成矿要素、成矿作用过程、成矿作用动力学去研究成矿的总体特征,包括矿床组合及有关地质异常之所以形成的原理,即研究成矿系列的成因、动力和过程。成矿系统在理论内容探索上更为全面。

总之,从系统观点看,成矿系列可以认为是成矿系统中的一个重要组成部分。

4.2 成矿系统与成矿区(带)

作为一个自然作用体系,成矿系统有其时间和空间边界。一个成矿系统所占有的区域空间包括直接矿源场、运矿通道、矿石堆积场以及矿化异常场等。这些可统称为矿化场或成矿场,其体积大小视不同的成矿系统类型而不同,例如沉积成矿系统的成矿场一般都大于斑岩成矿系统的成矿场。据统计,矿化场或成矿场的面积一般在几百 km^2 到几千 km^2 之间,大体相当于矿带的面积。

成矿区(带)是一个地质地域概念,是经长期地史演化的由一个或几个地体组成的复杂的地质巨系统,其中包括成矿系统(一个或多个)。成矿区(带)是成矿系统作用的环境,也是成矿系统的载体。而成矿系统则是成矿区(带)这个复杂巨系统中的一个起核心作用的子系统。正是由于成矿系统发生和存在于该地域中,才使它能区别于一般的地体而成为成矿区(带)。

研究成矿系统,都是在一定的成矿区(带)中进行的,成矿区(带)是研究成矿系统的最好

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的天然实验室 ,也是研究成矿系统的起点和归宿。当然 ,对成矿系统形成的规律性有较多认识之后 ,可以参照这些认识在条件可类比的新区(原来的无矿区、少矿区) 进行成矿预测和勘查 ,如经工作发现新矿床和成矿系统 ,则使该地域升级为成矿区(带) 。

4.3　成矿系统与成矿环境

成矿系统都产在一定的地质环境中 ,属于开放系统 ,“开放系统通过消耗环境中的物质和能量同时又向环境发散物质和能量(即物质和能量的交换) 而维持非平衡定态。‘耗’和‘散’二者相互依存 ,导致耗散结构的动态演变 ,使之从无序向有序转化”(於崇文 ,1998) 。成矿系统在运行过程中 ,从环境中获取成矿物质、流体和能量 ,而系统则向环境散发非成矿物质包括作用后的流体。通过“耗”和“散”实现成矿的功能。在实际研究中 ,成矿系统与环境处于互相交错互相作用的状态 ,一般情况下 ,难以具体地划出二者的边界。

在地质环境中 ,由于构造活动经常起主导作用 ,因此也称地质构造环境 ,如陆缘构造带、裂谷、大型盆地、大型剪切带等。从地质成矿演化史看 ,一定地质构造环境常产生一定的成矿系统 ,例如汇聚板块构造带中经常产出的斑岩成矿系统。研究成矿环境是认识成矿系统和划分成矿系统类型的基础和前提。

5　成矿系统的基本要素

一个系统由诸要素组成 ,各要素之间既互相独立 ,又互相联系。各个要素在系统中的地位和作用是不同的 ,有的处于主导地位 ,有的处于从属地位 ,但都是系统中不可缺少的部分。成矿系统中的基本要素有 : ①成矿物质 ; ②成矿流体 ; ③成矿能量 ; ④成矿流体的输运通道 ; ⑤矿石堆积场地。

5.1　成矿物质

成矿物质是成矿系统中的物质基础 ,包括金属元素、非金属元素、有机质和它们的化合物。地幔、地壳和水圈是成矿物质的总仓库 ,能源源不断地供应成矿物质。按成矿物质来源可分为幔源、壳源、壳幔混源、海水源、大气降水源以及星外源等 ,其中地幔、地壳来源是最重要的。成矿物质既可直接来源于一般岩石 ,也可来源于已初步富集某些矿质的矿源层(岩) 。对矿源层研究的大量文献表明 ,具备矿源层(岩) 固然有利于成矿 ;不具备矿源层(岩) 但成矿地质作用强烈、持续或反复多次 ,也能将一般岩石中某些成矿物质反复萃取和高度浓集而形成矿床。

矿质来源地可称为矿源场 ,类似名词但更宏观的有金属省或地球化学省 ,它们作区域性分布 ,并能在较长的地质历史中贡献成矿物质。一个成矿系统中有一个或若干个矿源场 ,可是同一性质的(如若干个含矿岩系) ,也可以是不同性质的(如形成铜矿的铜来自某含矿地层 ,也来自深源火成岩体) 。矿床中的矿质可是单组成的 ,如单一的铜矿 ,也可以是多组成的 ,如 Cu ,Au 矿床 ,Pb ,Zn ,Ag 矿床 ,它们或来自同一个矿源场 ,或来自不同矿源场而在运动汇集过程中实行多组分耦合而形成多矿种矿床。

作为矿质直接来源的含矿岩石建造(如某一地层组或某一含矿侵入岩套) 比较易于查明 ,而作为矿质间接来源的原生矿源地 ,因其反复变动或距矿产地很远而不易追溯。现今已有较系统的同位素地球化学和元素地球化学等示踪方法 ,用以提供关于成矿物质来源地的线索。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

5.2　成矿流体

指各类地质流体经过一定的地质演化而演变为包含和搬运成矿物质的那一部分流体,包括来源于大气降水、海水、地层水、岩浆水、变质水和幔源的流体等,一些矿化剂如 C,N,F,Cl,S,P 等也以多种形式被溶于水中参预对矿质的搬运和沉淀作用,在研究成矿流体时常包括它们在内。

成矿流体的功能是萃取、溶解、搬运和沉淀、聚集成矿物质,是沟通矿源场、运移场和储矿场的纽带和媒介,因而是成矿系统中最为活跃的要素。流体的稳定、充分供应是成矿系统能否正常运行的关键。在一个成矿系统中,成矿流体可以是一种类型、一个来源,也可以是几种类型、几个来源的耦合。不同类型流体的混合作用(如岩浆热液与大气降水混合)常是促使矿质沉淀的动力机制。区域尺度的成矿流体经常是多类型和多来源的,其运动和演化过程较为复杂。

5.3　成矿的能量

成矿作用动力学的核心是成矿作用的发生(onset),即矿化向成矿的转变,这就需要自然力的驱动。促使成矿的动力是广义的,有热梯度、压力梯度、浓度梯度、速度梯度和化学反应亲合力等。在这些作用力的驱动下,成矿系统这部"机器"得以发动和运行,包括流体的萃取、运移、流体输运过程中的水-岩反应(也即系统与环境的耗散作用等)以及流体中有用物质的沉淀堆积等。有了动力的供给,系统内部得以保持运动状态和具有自组织的能力,使从无序向有序演化,从而达到成矿功能。

成矿的能量基本上是从环境中汲取的,能量大小决定着成矿作用能否进行,能量过小不足以启动成矿或只有微弱矿化,使成矿系统走向"夭折",能量过大也不利于成矿,超过临界阈值时,系统将越过非平衡定态而达到"混沌",导致成矿物质运动趋于无序状态,因而破坏了有序的成矿过程。对于区域成矿作用来说,成矿所需的能量主要来源于有一定规模的构造运动和岩浆活动。而适度的能量供应一般都位于构造带和岩浆带的边缘转换部位。

5.4　成矿流体通道

指矿质及成矿流体在地质体中输运并趋向富集的渠道和路径,它是联系矿源场和储矿场的构造-岩石网络,也被称为运移场或中介场[5]。通道包括岩石中的孔隙、裂隙、断层、空洞等形式,具有连通性、方向性和局域性(不太散漫)。运移的主干通道一般是由构造作用形成的,如断裂带。但具有一定规模的透水层也可以作为流体的主干通道。

成矿通道有多种类型,这在矿田构造学中有较详细的叙述[19]。一个成矿系统中可有若干个相互连通的主干通道,它们组成矿化(蚀变)网络。在成矿过程中流体通道是动态的,在变化中的。主要变化表现为裂隙的张开和闭合,由此影响到流体运移的速度和方向。当含矿流体由多个通道向矿石堆积地汇集时,成矿可达到相当的强度从而有可能形成大型矿床。流体在岩石中孔隙中的主要运动方式是渗流,渗流的速度受多种因素的制约。

研究古流体通道有较大难度,可采用多学科综合方法,以区域中的蚀变岩带、蚀变构造、蚀变角砾岩、热液充填脉、火成岩脉、矿物流体包裹体、元素分布异常等作为流体运动的示踪标志,追溯一定时期中的含矿流体运移网络。而这个网络中的一些结点,有可能是矿质大量堆积形成大型矿床的地段。

5.5　矿石堆积场地

指矿床定位场所。在石油地质学中使油气汇集的构造-岩石因素称为圈闭(trap)[20,21],

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在金属成矿学中矿石堆积地也称成矿圈闭[22]或场地准备[23]。形成矿石堆积场地有 3 个条件:一是有足够的矿石堆积空间(可以是原已存在,也可以是在成矿过程中逐步扩展);二是有利于矿石沉淀的物理化学条件,常称为地球化学障、地球物理障或构造物理化学障,指物理化学性质的突变带;三是有封闭矿液使之汇聚而不致分散流失的圈闭(封闭)条件,包括岩性圈闭和构造圈闭或二者的复合。氧化还原界面和湖、海、洋的水体底界也可起到圈闭成矿的作用。

矿石堆积场地是由岩石-构造因素耦合形成的,又取决于其所在的深度和温度、压力状态。对大量的热液矿床来说,构造-岩相的局部异常并导致各种控矿参量(T, p, Eh, pH, $f(O_2)$, $f(S_2)$等)发生突变的地段,经常是矿石堆积的场所。矿石堆积场地的结构特征制约了矿石类型、矿体产状、形态、矿体与围岩关系等矿化特征,也影响到矿床的规模。如产在侵入体与碳酸盐岩接触带上的夕卡岩矿床,产于各种岩石断裂中的热液脉状矿床,以及经多期成矿叠加改造而成的层控矿床等。

在一个成矿系统中,矿石堆积场地一般有多个,每一个场地可成为一个矿床,这些矿床可是同成因类型,也可是不同的成因类型,视其具体的构造-岩石环境和成矿方式而定。当大量矿质向一个矿石堆积地汇聚时,则可形成较大规模矿床;当矿液向多个矿石堆积地分散时,常形成中小型矿床。

6　成矿系统的作用过程

6.1　基本的成矿作用概述

前述各成矿要素之间的相互联系、相互作用最终可以达到成矿物质的高度浓集形成矿床。按成矿作用发生、发展的阶段和过程,可将成矿作用分为 4 类:①从矿源地分离萃取矿质的作用(初步分异):包括溶解、溶蚀、吸附、风化剥蚀、自变质作用等;②输运矿质的作用(进一步分异):溶解(化合物、配合物)、胶体、悬浮、水-岩反应、淋滤、渗滤、径流等;③沉淀矿质的作用:由温度和压力突变、不同类型流体混合、沸腾、相分离、过饱和、蒸发、重力差异等因素造成的化学沉淀、生物化学沉淀、胶体沉淀和机械碎屑物堆积等;④矿床形成后的改造作用:物理风化、化学风化、生物风化以及热液改造、大气降水改造等。

这 4 类作用是互相连贯一环扣一环的,不能中断,不能旁移分散。对形成大矿,则需要成矿作用的反复持续进行,即多重富集作用。这 4 个阶段的成矿作用,在不同成矿环境和不同成矿系统中的表现形式不同,有的有很大差别,如岩浆成矿系统中主要作用方式是岩浆分异作用(结晶分异、熔离)、岩浆混合作用;在热液成矿系统中成矿方式主要是流体运移、水-岩反应、充填、交代等;在沉积成矿系统中主要是流水的冲蚀、搬运作用和湖水、海水中的沉淀、堆积、成岩及沉积分异作用;而在变质矿床中主要是变质重结晶、变质交代、脱水反应、矿物相变等;在表生成矿系统中生物有机质广泛参与成矿作用。由于成矿作用方式的明显差异而造成一个系统中可形成多种矿床成因类型。

6.2　成矿作用的发生

成矿系统研究的核心问题之一,是成矿作用何以能发生、能启动,这涉及复杂的成矿作用动力学研究。根据大量矿床成因研究的资料,可将发生成矿的条件概括为两种:①突变成矿(转变成矿[11])——各种控制因素和成矿参量的突变;②界面成矿(边缘成矿[24]、临界成

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

矿) ——地体边缘、岩体边缘、地层界面、岩相界面、地下水界面、氧化还原界面及其它各种临界面。突变成矿和界面成矿这二者是相辅相成的,是物质运动从量变演化到质变的不同表现形式。突变成矿和界面成矿都包括时间和空间因素,突变是在一定时-空条件发生的,界面也存在于一定时-空条件中。

在一个地区具备各项成矿要素时,一旦(短暂的)出现了突变、突发、质变、临界状态或事件(如岩石的破裂、地质体的崩塌、流体的沸腾、火山的爆发等),强大能量突然释放,含矿流体被激发起来,突然大量地运动,而流体内部也有明显的相转变,这相当于一个成矿机器的启动。以断裂带中的热液充填型矿床为例(这类矿床是常见的),岩石发生断裂前,是地应力逐步积累、增强的阶段,其附近的含矿溶液缓慢地渗流,以这种速度和强度,只能形成矿化。而当地应力积累到相当大,超过其所在岩石的抗应力强度时,岩石则会突然发生断裂,产生真空或大的自由空间,岩石中粒间溶液突然释压,获得自由流动空间,能够快速大量地运移,并在断裂空间中停积和沉淀成矿物质,从而形成工业矿脉。如果断裂反复发生多次,热液充填多次,则可形成有更大规模的复合矿脉。

因此,成矿作用的发生是具备各成矿要素,且它们之间互相耦合处在临界状态,并有突发运动(事件、作用)使之进入显著的成矿运动状态的结果。这种突发行为的产生可以是外部介质环境对成矿系统的持续扰动,或是系统内部持续涨落的结果,也可是这二者持续叠加导致扰动和涨落强化的结果。

6.3 成矿过程的持续

成矿作用是一种复杂的动力学过程,经历或长或短的地质时间,其时间长短因不同的成矿系统而有差异。据初步分析,多数成矿系统都有一个漫长的作用过程,可达几万年到上百万年。在这一漫长的成矿过程中,有的是渐变成矿的形式,有的则因为发生突变而显示出成矿阶段性。如一个大的岩浆热液成矿系统可分出岩浆自交代、超临界流体作用、热液作用等几个成矿阶段。这一渐变到突变的过程可用不同阶段生成的矿体间的穿插包裹或矿物流体包裹体、微量元素等的明显差别作为划分标志,也可以用同位素测年方法求得同一系统中不同矿床类型的年龄差别来作为划分标志。

形成较大规模的矿床多是成矿作用稳定持续进行的结果。这需要矿质、流体和能量的源源不断地供应;也要求成矿系统本身具有优化结构,具有良好的自组织功能。即对于环境的干扰或系统内部各要素间不协调而造成的成矿“故障”、“停顿”,成矿系统本身具有非线性反馈的动力学机制,即自组织、自调节的能力,能自发地针对存在的干扰作出必要的调整,以维持成矿作用的继续进行。以热液充填矿床为例,当一股含矿热液进入一个裂隙,矿物沉淀结晶充满裂隙,裂隙被封闭,后续热液无法进入时,则持续的构造运动又开启相邻的平行裂隙,使后一股热液得以流入充填,在一个裂隙带中充填作用反复进行则成矿功能可以完成。又例如,当上升炽热流体因受岩性圈闭、过高围压而受阻无法前进时,持续汇集的流体的内能增加,当具备强大动能时,足以发生隐蔽爆炸作用,使围岩破碎,能量释放,自由孔隙大增,后续含矿热液得以大量涌入,由于温、压突降,导致矿质的大量沉淀而成矿。在有些矿床中,可见到多种复成分蚀变-矿化角砾,显示隐爆作用不止一次,而是多次。这也说明,一个结构优化的成矿系统,具有反复的自组织功能以保持较强的聚矿能力。

6.4 成矿过程的结束

关于成矿作用结束的机理和鉴别标志还很少研究。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在一个成矿过程中,成矿物质消耗殆尽而没有新的补给时,成矿过程即告结束。例如,在热液成矿系统中,成矿作用结束后仍会有后期热液矿物组合,如碳酸盐矿物、石英、镜铁矿、玉髓等生成;有些岩浆热液成矿系统则以成矿后大量脉岩的出现作为成矿结束的标志。

成矿过程的结束还有另外一种形式,即成矿物质仍具备,但成矿的能量过大,或自组织功能减退,使系统发生过度的振荡或涨落,由有序状态进入"混沌"的无序状态,从而中止了成矿过程。

7　成矿系统的作用产物

一个成矿系统的作用产物包括矿化带、矿化区等,它们是由多个矿床、矿点和各类异常组成的。

(1) 矿床:成矿作用的主要产物是矿床,根据各成矿要素耦合情况的差异和控矿因素的局部变异,可形成若干不同成因类型的矿床;又根据成矿元素组分的不同,可有不同矿种(组合)的矿床;总的形成不同矿种不同类型的矿床群体。一般将一个区域中有成因联系的不同矿床类型组成的整体称为成矿系列或矿床系列,例如长江中下游中生代中酸性岩浆-热液成矿系统中的矽卡岩型 Fe-Cu 矿、斑岩型 Cu-Mo 矿和角砾岩筒型 Cu-Au 矿等,即组成一个成矿系列。

这些不同类型矿床具有一定的时-空结构,在空间上常表现为集群性和分带性;在时间上显示阶段性、叠加性;在物质组成上常表现为互补性,即一个成矿系列中矿床规模有大有小,显示出成矿物质在各矿床中聚集强度的不均匀性。

(2) 矿点:在成矿系统的产物中,矿质虽有一定浓集但根据目前经济技术条件尚不能工业利用的矿化称为矿点或矿化点。矿点的数量一般多于矿床。有些矿点虽暂时不能利用,但在具备更高科技条件或矿业市场供求情况变化时,有可能被开采利用而升级为矿床。另外,矿点在理论研究上的意义是提供关于了解成矿系统全局的信息,它在找矿中可作为找寻工业矿床的标志。

(3) 矿致异常:在成矿系统的产物中,伴随着矿床和矿点的形成,产生各类异常(地质的、地球化学的、地球物理的),它包括矿物的、岩石的、元素的、同位素的、流体的、构造的、以及重、磁、电、放射性等种种异常。这些异常或产在矿体附近,由矿体物化性质直接引起;或产在矿源场和运矿通道中,由含矿流体的水-岩反应或沉淀物引起。矿致异常一般占有比矿体更大的空间,作有规则或无规则的分布,常表现为分带性。

在成矿系统研究中,重视研究异常现象,是本文作者所强调的[11]。这是因为,异常的种类多、范围广,且多呈带状或面状,远大于矿床的空间范围,因此能被保留,被人们发现的几率也高。异常能提供较多的有关成矿系统的信息,对它的研究有利于认识成矿系统的全貌和全过程。异常是找矿的标志,尤其是异常浓集区、多种异常叠加区和异常转变区等,常是比较有效的找矿标志。

(4) 矿化-异常网络:矿床、矿点、矿化和各类异常是成矿系统的主要产物,它们在形成时间上有早有晚,形成过程有长有短,常表现为阶段性;在空间上组成有序的结构,形成三维的矿化-异常网络,它常表现出分带性。阐明区域成矿分带是成矿系统研究的重要内容。在火成岩和沉积岩都有分布的地区,可从两方面来探讨成矿分带的原因,一是岩浆和流体上升

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

就位所造成的岩体内外的矿化分带(矿种的、矿化类型的) ,一是围岩地层的物化性质及所含成矿元素受岩体热力和流体影响而显示出的分带。对不少成矿区来说 ,这两个主要因素的耦合是造成复杂分带的基本原因。可以形象地说 ,矿化-异常网络包括成矿阶段和成矿分带 ,相当于成矿系统的作用过程被凝固在一个特定的时-空域中。在电子计算机上能基本再现这种丰富多彩的矿化时-空结构图像和形成、演化过程[10]。

8　成矿系统的后期变化与保存

一个成矿系统的作用过程结束后 ,其所生成的矿床、矿点和异常又进入一个新的发展阶段 ,即这些产物经受后来地质作用的变化和被改造的阶段。主要的改造作用有构造变形、流体的溶解、溶蚀和蚀变、变质作用和地表风化剥蚀、搬运和掩埋作用等。有关矿床改造作用的详细论述见另文[25] ,此处着重说明变化改造的结果。作为一个矿床 ,其经受后来的地质变化有变形、变质、变位、变品位、变规模等 ,其结局是保存、部分保存、转化为其它类型(如原生矿-砂矿) 和消亡等。但作为一个成矿系统 ,它包括矿源场、中介场、储矿场以及形成的矿化带等广大体积 ,其受改造的情况远比单个矿床要复杂得多 ,关键问题是系统中的矿床和有关异常被改造和保存的情况。

在地壳中基本上作垂向延伸的上升热液成矿系统 ,其矿床顶缘的矿化蚀变带易受风化剥蚀 ,而偏下部产出的中介场和矿源场较易保存。中下地壳中发育的变质成矿系统因其矿床地质产状复杂 ,没有垂向延深趋势 ,其首先被风化剥蚀的部分难以预料。地表产出的沉积成矿系统因其矿床产状较平缓 ,矿体及有关异常以侧向延伸为主 ,且矿床常产在低凹的盆地中 ,因此 ,其矿源场和中介场被破坏的可能性较大 ,而掩埋在盆地中的矿床 ,如未遭受明显构造变动 ,则较易保存。风化成矿系统及其矿床的产状多变 ,当矿源场、中介场、储矿场三者合为一体时 ,则一起被破坏或被保存。当矿源场在上 ,中介场向下延深 ,储矿场在地下一定深度时 ,如风化淋积矿床 ,则矿源场易先受风化剥蚀。

一个成矿系统在经受后期变化改造后 ,如果主要矿床能被保存下来 ,则成矿系统的要素和作用过程有可能“再造”,如果一个成矿系统中的矿床被破坏大半 ,则只能靠残留的矿床 ,并联系其周围地质环境和地质条件 ,来“再造”成矿系统的部分原貌 ,但其难度是很大的。

之所以要研究成矿系统产物的变化保存情况 ,是因为古成矿系统的有关信息大都被保存在现存的矿床之中 ,研究成矿系统要从现存的矿床、异常及其现在的地质环境入手 ,再反推到其原来的成矿要素、作用过程和产出条件等。地质研究很多情况下是由今及古的 ,成矿系统研究也不例外。反过来 ,在对成矿系统的演化历史有了基本认识后 ,对于认识成矿系统的保存情况及评估区域矿产潜力就更有科学依据。

9　成矿系统的类型划分

在地球历史演化过程中 ,因地质成矿作用的差异而形成多个成矿系统。如何科学、简明、实用地划分成矿系统 ,值得认真研究。笔者初步提出以下分类方案 ,供研究参考。

9.1　按构造动力体制划分成矿系统大类

成矿系统作用过程是地球物质运动的一种独特形式。地球物质运动的基本形式是构造

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

运动。大型或巨型构造不仅是地壳或岩石圈受力变形的产物,而且它的形成和演化控制着与其有关的沉积、岩浆、变质、流体等作用。因此,它的内涵不仅包括地质体的形变(改造),也包括了新的地质体的形成(建造)。从构造-成岩-成矿的观点出发,可以以成矿的构造动力学体制作为划分成矿系统大类的主要依据。常见的构造动力学体制,可按其所反映的地壳变形场分为:反映地壳水平运动的伸展、收缩和走滑,反映垂向调整运动的隆升和沉降;还有大型韧性剪切和大型撞击构造等。共有 7 种基本的构造动力体制:①伸展(拉张) ——裂谷、大型生长断层或同生断层、盆岭构造、变质核杂岩构造等;②收缩(挤压) ——板块俯冲带含岛弧、陆缘岩浆弧、构造混杂岩带等,大型推覆构造,大型逆冲断层等;③走滑 ——转换断层、走滑断层系(含拉分盆地)等;④隆升 ——地幔柱上升、地壳热隆(点)、底辟构造系等;⑤沉降 ——沉积盆地、拗陷带等;⑥大型韧性剪切 ——结晶基底的韧性剪切带,有逆冲、正滑、走滑之分;⑦大型陨石撞击 ——古陨石坑及相伴的侵入杂岩。

表 1　主要的成矿系统类型

Table 1　The main types of metallogenic system

成矿系统类	成矿系统	主要矿产或建造	环　境
Ⅰ 岩浆成矿系统类	1. 镁铁质-超镁铁质类	Cr ,Cu ,Ni ,ΣPt , Ti ,V ,Fe …	台区、槽区; 陆相、海相; 深部、浅表
	2. 幔壳源花岗岩类	Fe ,Cu ,Au ,Pb ,Zn ,Mo ,Sn …	
	3. 壳源花岗岩类	W ,Li ,Be ,Sn ,Nb , Ta ,REE …	
	4. 碱性岩-碳酸岩类	金刚石 ,Nb ,P ,REE …	
	5. 火山-次火山岩类	Cu ,Au ,Sn ,U ,Ag ,非金属 ……	
Ⅱ 热液(水)成矿系统类	6. 斑岩热液	Cu ,Mo ,Au	台区、槽区; 陆相、海相; 以浅表环境为主
	7. 火山热液(含 VMS)	Cu ,Pb ,Zn ,Fe ,S ,Au ,Ag	
	8. 浅成低温热液(含 MVT、卡林型)	Pb ,Zn ,Ag ,Au ,U ,Hg ,Sb	
	9. 动力热液	Au ,Ag ,Pb ,Zn	
	10. 热水沉积(含 Sedex 型)	Pb ,Zn ,Cu ,S	
Ⅲ 沉积成矿系统类	11. 滨海-浅海相沉积	Fe ,Mn ,P ,Al …	陆区、海区、海陆过渡带
	12. 深海相(含黑色页岩相)	V ,U ,Ni ,Co ,Mn …	
	13. 陆相及泻湖相蒸发沉积	钾盐、岩盐、石膏 ……	
	14. 陆相及滨海相砂矿	Sn ,Au ,金红石 ……	
	15. 陆相砂岩型	Cu ,Pb ,Zn ,U …	
Ⅳ 生物成矿系统类	16. 陆相及海陆交互作用相成煤	煤、煤层气 ……	各类盆地
	17. 陆相及海相成油气	石油、天然气 ……(也有无机成因的)	
	18. 生物岩类	礁灰岩、磷块岩	
Ⅴ 改造成矿系统类(或叠加改造成矿系统类)	19. 变质改造(含 BIF)建造	Fe-Si 建造 ,Fe ,Au …	古陆、古陆活化区、低纬度带
	20. 动力改造(含剪切带 Au 矿)	Au …	
	21. 岩浆(热液)改造	Cu ,Fe ,Pb ,Zn …	
	22. 风化改造	Ni ,Al ,Cu ,Fe ,Mn …	

说明:①此分类以金属成矿为主;②每一系统中还可按主岩、矿源、元素组合类型的不同划分为亚系统;③各系统间有一些过渡、转化或复合类型。

以上 7 种构造动力体制间还有各种过渡、复合或转化型式。每一类构造动力体制都有特定的构造组合、岩石建造和成矿系统,即:A-伸展构造成矿系统(大类);B-挤压构造成矿系统(大类);C-走滑构造成矿系统(大类);D-隆升构造成矿系统(大类);E-沉降构造成矿系统(大类);F-大型韧性剪切成矿系统(大类);G-陨击构造成矿系统(大类)。每一成矿系统大类间还有过渡、复合等型式。当前,已基本识别出三大类成矿系统,即伸展构造体制下的流体聚敛成矿系统、挤压构造体制下的岩浆-热液成矿系统、剪切-走滑构造体制下的热动力成矿系统。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

现以裂谷为例加以说明,裂谷不仅在平面上延伸甚远,还在垂向上切割地壳乃至岩石圈,有明显的垂向分带。裂谷上部广泛发育以正断层为主的巨型地堑系,多表现为断陷盆地,沉积一套巨厚的碎屑沉积建造,常伴有蒸发岩和火山岩。裂谷上部盆地中伴随着生长断层活动,常产生 VMS 型成矿系统和 Sedex 型成矿系统。

裂谷的中深部产出拉张环境中侵位的基性、碱性和超基性岩带,某些地区表现为岩盆(如南非布什维尔德岩盆)或岩墙(如津巴布韦"大岩墙"),有关的成矿系统为镁铁质-超镁铁质岩类成矿系统(Cr ,Cu ,Ni ,ΣPt , V , Ti ,Fe 等)。现有资料表明,并不是每一裂谷都有完整的垂直分带,这一模式只在规模巨大、时代较老和长期活动的裂谷带表现明显。

9.2　按成矿机理划分成矿系统类

在上述按构造动力型式划分成矿构造背景和成矿系统大类的基础上,再按主要的成矿机理划分出几个基本的成矿系统类,每类中再按含矿建造及成矿环境划分为若干个成矿系统(表 1)

9.3　成矿系统的分类层次

综合上述,可将成矿系统的分类层次表示为:

A　成矿系统大类(按构造动力体制划分)

　I　成矿系统类(按成矿机理划分)

　　1　成矿系统(按含矿建造或成矿空间划分)

以上说明了笔者关于成矿系统分类的思路。考虑到这个问题的复杂性,目前还不宜划分太细太固定。宜留出较多的空间和余地,以利于探索。关键的一点是运用成矿系统的观念和方法。

9.4　古大陆边缘-构造成矿系统举例

古大陆边缘经历了漫长时期的地质作用,壳幔作用活跃,构造运动复杂,各圈层的物质及能量交换频繁,成矿作用丰富多彩,产有多种成矿系统。按照古大陆边缘的构造动力学特征,可分出离散型陆缘、会聚型陆缘和转换(走滑)型陆缘,各有其特定的构造组合、含矿建造

表 2　古大陆边缘构造-成矿系统

Table 2　Tectono-metallogenic system in paleao-continental margin

陆缘构造动力型式	陆缘类型	构造部位	代表性成矿系统	主要矿种	成矿带实例
离散型(拉张)	被动陆缘	裂谷、拗拉谷、同生断层、陆缘盆地、陆缘海、大陆架	热水沉积型、火山热液型、沉积和生物沉积型	Pb , Zn , Cu , Fe , REE , Mn , Al , P	狼山—渣尔泰山 Pt_2 成矿带、南秦岭 Pz_2 成矿带、扬子陆块西南缘 Pz_1 磷成矿带
会聚型(挤压)	主动陆缘	岛弧、陆缘岩浆弧、构造混杂岩、逆冲推覆带、弧后盆地	火山热液型、斑岩热液型、中深成岩浆热液型、浅成低温热液型、动力改造成矿型	Au , Cu , Mo , W , Sn , Pb , Zn , Cr , Ni	日本列岛、美洲西缘 Mz—Kz 成矿带、华北陆块北缘中段前寒武纪成矿带
转换型(走滑)	转换陆缘	走滑断层系(含拉分盆地及火山-次火山带)	动力改造成矿型、斑岩热液型、火山热液型、热液改造型	Au , Cu , Mo , Cr	郯庐断裂系 Mz 成矿带、滇西三江地区 Kz 成矿带

和成矿系统(表 2)。我国古陆块数量较多、体积较小,陆缘构造带的面积较广,产有多个成矿系统和相应的成矿区带,值得深入研究。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

10　成矿系统分析与矿产勘查工作

矿床研究主要是为矿产勘查服务的,一个成矿概念和观点的提出都将直接或间接与矿产勘查相关联,成矿系统分析也是如此。成矿系统概念的建立,和针对所研究区域的地质历史和地质矿化特征所提出的成矿系统概念模型,有助于对一个区域中一定地质时期的成矿事件和矿床时-空分布等建立一个整体概念。有了这样一个全局概念,就可能对区内各种矿床、矿化异常、控矿因素等作出恰如其分的评价,从而可以提高成矿预测和找矿的成效。

在成矿系统的概念模型中,着重说明了控制成矿的关键因素,例如,突变成矿和界面成矿,也即成矿发生的临界条件。这个临界条件的认识和掌握,要依靠对成矿系统动力学过程的全面研究。在成矿系统的产物中,包括矿床系列和异常系列,它们构成三维的矿化-蚀变网络和分带,呈有序的结构。成矿系统分析中要注意研究成矿系统遭受后来地质作用的变化和改造,这使我们有可能认识该成矿系统产物及诸要素的现今保存情况,哪些矿床(类型)已被破坏不复存在,哪些矿床还有保留以及它们的可能产地,作到心中有数,这自然对找矿工作有实际的帮助。

总之,成矿系统研究的观点和方法,成矿系统概念模型的建立,有助于将矿床地质研究工作建立在较为完整的科学理论基础之上,将会提高找矿勘探工作的成效。反过来,在勘查实际中获得的新鲜的丰富信息和经验可以修改、补充、完善原有的成矿系统理论框架和概念模型,为更好地指导矿产勘查创造条件。

应当指出,一个成矿系统是一定的地质历史阶段的产物,古老成矿系统因受后来地质变动而难以完整保存,很难全面认识其形成要素和作用过程。已有的对古老成矿系统的认识不少是推测性的,还需要作深入研究。目前,对成矿系统研究仍处在起步阶段,许多科学问题有待深入探索。

本文的要点曾与蔡克勤、崔彬、肖荣阁、邓军、黄华盛等教授及彭润民副教授作过讨论交流,论文的初稿曾经石准立教授审阅并提出中肯改进意见,笔者对他们的帮助和支持表示衷心的感谢。

参 考 文 献

1　Геологический словарь(Том 2) . М : Недра,1973. 448
2　程裕淇,陈毓川,赵一鸣,等. 初论矿床的成矿系列问题. 中国地质科学院院报,1979 ,1 号:33～58
3　翟裕生,姚书振,林新多,等. 长江中下游铁铜矿床成因类型及成矿系列探讨. 地质与勘探,1980 ,16(3) :9～13
4　於崇文. 成矿作用动力学 ——理论体系和方法论. 地学前缘,1994 ,1(3) :54～82
5　李人澍. 成矿系统分析的理论与实践. 北京:地质出版社,1996. 19～20
6　翟裕生,秦长兴. 关于成矿系列和成矿模式. 见:刘云从主编. 矿床学参考书(下册) . 北京:地质出版社,1987. 214～227
7　翟裕生. 成矿系列研究问题. 现代地质,1992 ,6(3) :301～308
8　翟裕生. 矿床学思维方法的进步. 见:赵鹏大,王亨君主编. 地球科学思维. 北京:地震出版社,1993. 74～84
9　翟裕生. 区域成矿学研究问题. 全国第六届矿床学学术会议论文集. 北京:地质出版社,1998. 253～258
10　翟裕生,姚书振,崔彬,等. 成矿系列研究. 武汉:中国地质大学出版社,1996. 192
11　翟裕生. 矿床学的发展前景和思维方法. 地学前缘,1994 ,1(3) :1～8
12　翟裕生. 古大陆边缘构造演化和成矿系统. 见:北京大学地质系主编. 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集. 北京:地震出版社,1998. 769～778

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

13 翟裕生. 成矿系统的结构框架和基本类型. 见:中国科学院地球化学研究所等编. 资源环境与可持续发展. 北京:科学出版社,1999. 77～82

14 Щарапов В Н *Развитие эндогенных флюидных рудообразующих систем.* Новосибирск: Наука, 1992. 47～48

15 Jasques A L. The role of GIS, empirical modeling and expert system in metallogenic research. *GSA, Abstract*, 1994 (3):196～197

16 於崇文,岑况,鲍征宇,等. 成矿作用动力学. 北京:地质出版社,1998. 1～23

17 程裕淇. 中国大百科全书(地质卷). 北京:中国大百科全书出版社,1993. 343～344

18 陈毓川,裴荣富,宋天锐. 中国矿床成矿系列初论. 北京:地质出版社,1998. 1,3,63～75

19 翟裕生,林新多主编. 矿田构造学. 北京:地质出版社,1993. 158～177

20 费琦. 论石油体系. 地学前缘,1995,2(4):163～170

21 Magoon L B,Dow W G. The Petroleum System —from source to trap. *AAPG*,1994(Memoir 60):3～23

22 冯景兰. 关于成矿控制及成矿规律的几个重要问题的初步探讨. 见:谢家荣主编. 矿床分类与成矿作用(论文集). 北京:科学出版社,1963. 36～57

23 Guilbert J M,Park C F Jr. *The Geology of Ore Deposits*. New York:Freeman Company, 1986. 67～88

24 孙启祯. 边缘成矿与成矿边缘效应. 地学前缘,1994,1(3):176～183

25 翟裕生. 论矿床形成后的改变与保存. 地学研究,第29—30号. 北京:地质出版社,1997. 267～273

ON THE METALLOGENIC SYSTEM

Zhai Yusheng

(China University of Geosciences, Beijing, 100083*)*

Abstract Metallogenic system is an important topic in the study of geology of ore deposits. It is also a symbol to show the systematic and globalizing tendency in the metallogenic research. Metallogenic system, often within a certain geological time-space realm, is a natural system with ore-forming function. It includes geological factors controlling ore-formation and preservation, ore-forming processes and its products —ore deposit series and anomaly series. Based on the study of the genesis of ore deposits, metallogenic system discusses regional metallogeny in a macroscopic way by combining metallogeny with time, space, substance and movement. Its study significance lies in: (1) to understand deeply the mechanism of metallogenic dynamics; (2) to guide the exploration of ore deposits; (3) to promote the application of metallogenic information to the other disciplines of geosciences. This paper discusses the relation and difference among metallogenic system, metallogenic series and metallogenic district and also illustrates basic factors, processes, products, variation and preservation of metallogenic system. In addition, this paper suggests to classify the principal types of metallogenic systems according to their different tectono-dynamic framework and to classify the secondary types according to their ore-forming mechanism. Taking tectono-metallogenic system in the paleo-continental margin as an example, this paper explains the relationship among the tectono-dynamic framework, structural association and metallogenic system in its last part.

Key words metallogenic system, definition, texture, process, preservation, classification, metallogenic series, metallogenic district (belt)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net