

成矿系统研究与找矿

翟裕生

(中国地质大学, 北京, 100083)

摘 要:成矿系统研究适应了地球科学系统化的发展趋势,是当今矿床学研究的重要内容之一。文中在对成矿系统的定义、结构、要素、作用产物等进行论述的基础上,提出成矿系统研究的 4 个要点:①按构造动力体制划分成矿系统大类;②多因耦合、临界转换的成矿作用机理;③矿床系列和异常系列构成的矿化网络;④矿床形成—变化—保存的演变过程。作者明确了成矿系统研究应从矿化网络入手的方法,总结了矿化网络研究的主要内容,提出了通过成矿系统研究发现新类型矿床的几个途径,分析了成矿系统研究的资源环境效应,并探讨了成矿系统研究的理论意义。

关键词:成矿系统;矿化网络;新类型矿床;资源环境效应

中图分类号:P61

文献标识码:A

文章编号:1672-4135(2003)02-65-07

1 概述

成矿系统研究是系统科学方法在矿床学中的一种创新性应用,它是在矿床组合、成矿系列等研究的基础上发展起来的,体现了现代矿床学向系统化、全球化发展的一种趋势,拓宽了矿床学研究领域,给矿床学研究注入了新的活力。

1.1 成矿系统的定义

成矿系统一词最早出现在 1973 的俄文地质辞典^[1]中,它被解释为“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”。之后 M. П. 马祖洛文^[2]、B. И. 森雅克夫^[2]、B. M. 契克夫^[3]、A. L. 贾奎斯^[3]以及我国学者於崇文^[4,5]、李人澍等也先后有过关于成矿系统的论述。翟裕生^[7,8]提出“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”。成矿系统的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,以及成矿后变化保存等四方面基本内容,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。

成矿系统不同于成矿系列。“成矿系列是具有成因联系的矿床所组成的自然体”,是“四维生

间中有内在联系的矿床组合(陈毓川等 1998)”。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,而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伤体系。它主要从成矿要素、成矿作用过程、成矿作用动力学动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,从系统观点看,可以认为成矿系列是成矿系统中的一个重要组成部分。

1.2 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以下四个部分: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。成矿系统的基本结构可表示如图 1。

收稿日期:2003-01-23

基金项目:国土资源部地质调查项目(K1-4-1-5);中国地质调查局项目(200110200069)

作者简介:翟裕生(1930),男,中国科学院院士,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。

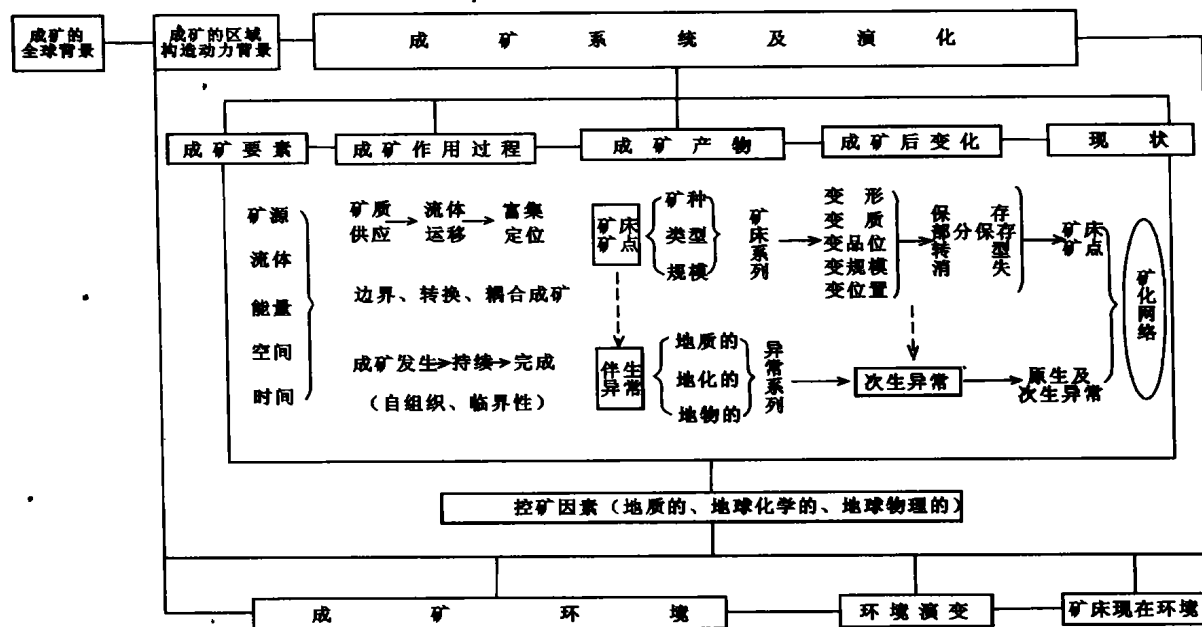


图 1 成矿系统及其演化

Fig. 1 Metallogenic system and its evolution

1.3 成矿系统基本要素

成矿系统的基本要素:成矿物质、成矿流体、成矿能量、输运通道、矿石堆积场地。

(1)成矿物质是成矿的主要物质基础,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。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)。矿床中的矿质可是单组分的,如单一的铜矿,也可以是多组分的,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通过多组分耦合而形成多矿种矿床。

(2)成矿流体指各类地质流体经过一定的地质演化而成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 F、Cl、S、P 等也以多种形式被溶于水参与对矿质的搬运和沉淀作用。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,是成矿系统中最为活跃的元素。

(3)成矿能量成矿作用动力学的核心是成矿作用的发生。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和力等。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。

(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,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。运移的主干通道一般是由构造作用形成,如断裂带。具有一定规模的透水层也可以作为流体的主干通道。

(5)矿石堆积场地是由岩石—构造因素耦合形成的,形成矿石堆积场地有三个条件: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。

1.4 成矿系统作用产物

一个成矿系统的作用产物包括矿化带或成矿带等,它们由多个矿床、矿点和各类异常组成。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,形成三维的矿化网络。

矿床是成矿作用的主要产物。一个成矿系统中可以形成不同矿种不同类型的矿床群体。这些

不同类型矿床具有一定的时—空结构,在空间常表现为集群性和分带性;在时间上显示阶段性、叠加性。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。

除矿床外,成矿作用还经常形成有一定浓集但根据目前经济技术条件尚不能被工业利用的矿化称为矿点或矿化点。有些矿点虽暂时不能利用,但在具备更高采选冶水平或矿业市场显著需要时,有可能被开采利用而升级为矿床。

伴随着矿床和矿点的形成,还会产生各类异常(地质的、地球化学的、地球物理的),它包括岩石的、矿物的、元素的、同位素的、流体的、构造的、以及重、磁、电、震、放射性等种种异常。这些异常或由矿体物化因素直接引起,与矿体关系密切,一般占有比矿体更大的空间,常表现出分带性。

2 成矿系统研究要点

2.1 按构造动力体制划分成矿系统大类

成矿系统是大陆动力演化的产物,构造动力是成矿的基本因素之一,不同构造动力体制产生

不同的成矿系统。常见的构造动力学体制有7种: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。

以上7种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。

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)。

表1 主要的成矿系统类型
Table 1 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、 Σ Pt、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; 台区、槽区; 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、 海陆过渡区
	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. 陆相及海相交互成煤	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、 低纬度区
	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...	

注: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。

2.2 多因耦合、临界转换的成矿作用机理

成矿作用是一类特殊的地质事件,多因耦合与临界转换是成矿作用发生的普遍机制。

多因:成矿作用涉及地质的、化学的、物理的、生物的诸多因素,地质因素中又包括构造的、岩石的、地层的等;物理、化学因素中又包括温度、压力、物质组份及行为等;其作用过程又与源、流、运、储及相关制约因素密切联系。

耦合:指上述各因素间的相互作用和彼此影响,多种有利控矿因素在一定时空域中耦合是成矿作用发生的重要条件。

临界:不同状态的转换点(边缘成矿、界面成矿……)。各种控矿因素在特定条件下呈现出临界状态,造成各种界面和边缘,常是成矿作用发生的有利地段和有利时段。

转换:控矿因素和成矿参数的转变(转折),包括突变、渐变。不同环境、不同尺度、不同形式的成矿参数的临界转换,是很多矿床形成的基本条件。

以上几点是常见的成矿作用机制,详见有关文献^[10~20]。现以华北克拉通北部 SEDEX 型铂、锌、铜、硫矿床为例,说明多因耦合程度不同导致的成矿差异(表 2)。这些矿床都产在元古代的陆缘或陆内裂谷(或裂陷槽)环境,都是由热水沉积作用形成,其矿质既有幔源也有壳源,在具备较充分矿质的基础上,由于具体的控矿因素不同,导致其矿床规模有明显差异。需要说明的是,表 2 中的对比是经验性的、定性的,有待向定量方向发展。但它说明了多个成矿条件同时出现在成矿的局部地段,达到成矿要素的充分耦合是形成大型—超大型矿床的一个重要条件。

表 2 古大陆边缘构造—成矿系列

Table 2 Tectonic—metallogenic system in the old block 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)伸展	被动陆缘	裂谷、坳拉谷、同生断层、陆缘盆地、海大陆架	热水型沉积、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 Pt ₂ 成矿带、南秦岭 Pt ₂ 成矿带、扬子陆块西南缘 Pt 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、浅层低温热液型、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	卢断裂成矿带、滇西三江地区 Kz 成矿带

表 3 华北克拉通北缘 SEDEX 矿床成矿要素

Table 3 Mineralization factors of the SEDEX ore in the north margin of North China Block

矿床		霍各乞	炭窑口	东升庙	甲生盘	三片沟	高板河
成矿要素							
陆缘裂谷		○	○	○	○	○	○
次级断陷盆地		○	○	○	○	○	○
半封闭海湾		△	○	○	○	○	○
生物有机质发育		△	○	○	○	○	○
强还原环境		△	○	○	○	○	○
富碳-硅-泥-碳酸盐岩相		○	○	○	○	○	○
同生断层发育		○	?	○	△	?	○
区域断裂交汇		○	?	○	×	×	×
同期火山活动		○	△	△	?	?	?
热水沉积作用		○	○	○	○	○	○
保存条件好		○	△	○	○	○	○
矿种		Cu、Pb、Zn	Zn、Cu、Pb、S	Zn、Pb、Cu、S	Zn、Pb、S	Zn、S	Zn、Pb、S
矿床规模	金属	超大	大	超大	大	小	大中
	硫铁矿	无	超大	超大	大	大	大

注:○. 满足; △. 部分满足; ×. 不满足; ?. 不清楚

控矿参数的联动转换可能是形成大矿的一种机制,如在变质核杂岩的构造—流体成矿系统,伸展作用导致的地壳变薄和地幔上隆造成了变质核杂岩区的高地热梯度的高热流环境,有利于地壳下部岩石的混合岩化和重熔,使以壳源为主的中酸性岩浆活动常发育于变质核杂岩的中心部位,为成矿元素的迁移提供了热能。下盘岩石在地壳深处以韧性变形为主,形成网络状韧性剪切带,使基底岩系或侵入其中的基性岩糜棱岩化,提供部分变质热液,加上岩浆来源的热液,形成还原环境下的热液

循环系统。在构造泵吸作用下,热液淬取了分散在基岩中的成矿组分,成为含矿热液。上盘高角度正断层系和脆性破裂系为地下水的深循环提供了通道,异常的热梯度为流体循环提供了热能,从而形成一个与大气降水体系相连的氧化环境下的水热循环系统(图2)。剥离断层构成了一个构造、流体和Eh都呈显著差异的临界转换带,两套不同性质的热水循环系统在剥离断层附近交汇,形成很好的氧化—还原带,成为矿质沉淀的地球化学有利地段。

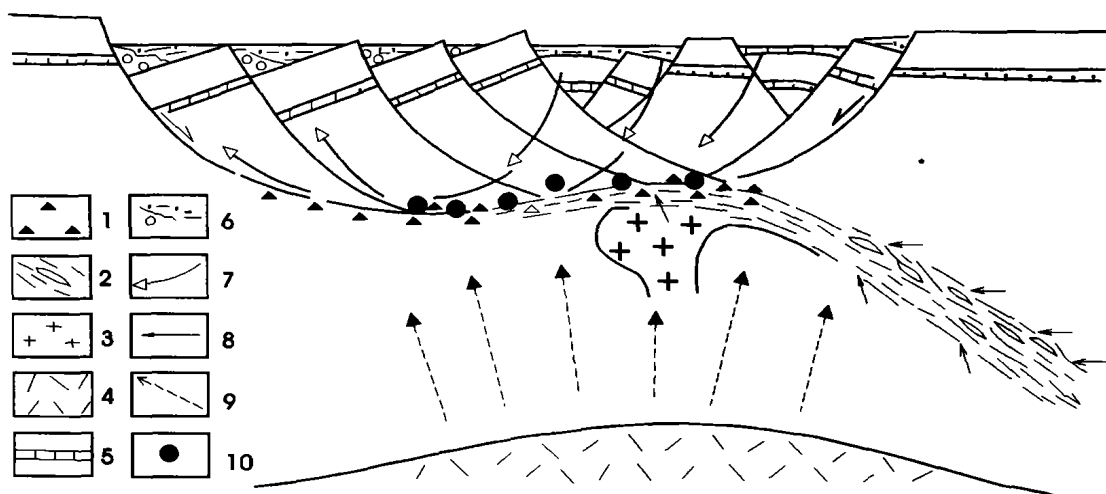


图2 变质核杂岩构造流体系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the structure—fluid system of the metamorphic core complex

1. 碎裂岩带;2. 糜棱岩化带;3. 同构造花岗岩;4. 岩石圈地幔;5. 沉积岩层;6. 表生堆积物;7. 上盘流体系统;
8. 下盘变质热液流体系统;9. 幔源热液及气液系统;10. Cu, Pb, Zn, Au 矿床

2.3 矿床系列、异常系列构成的矿化网络

矿床系列是指由统一的成矿作用生成的诸矿种、诸矿床类型的共生组合,或称矿床组合。与该矿床系列伴随的各种矿化异常(地质的、地球化学的、地球物理的、遥感的、生物的……)作

为一个整体,称为异常系列或称综合异常。

矿床系列和异常系列都是成矿系统的产物,它们相互依存,共同构成矿化网络(图3)。矿化网络表现了在一定的地质背景、环境中由成矿系统形成的各矿床类型和有关异常的时空结构。

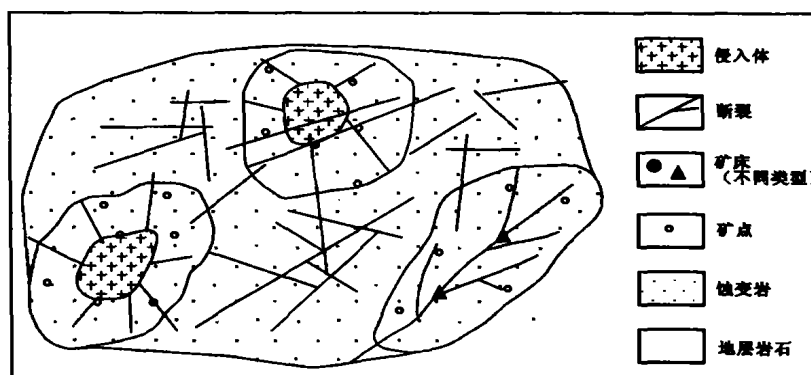


图3 矿化网络结构简图(平面图,以热液矿床为例)

Fig. 3 Schematic map of the mineralization net structure

它是一个四维的(空间+时间)成矿地质体,既包含已知即已经发现的矿床和确实存在但尚未被发现的矿床;也包括已知的矿产资源和未知的潜在资源。这一认识反映了成矿系统和矿化网络的开放性和动态性,有重要的理论和实际意义。

2.4 矿床形成—变化—保存的全过程

矿床是地质历史的产物,它们在地质历史中产生,又在地史中消亡。一部分有幸保存下来的矿床也经过了变化。因此,矿床学的基本内容是研究矿床的“来龙去脉”,即研究矿床形成、变化、破坏或保存的全过程^[21]。这是现代矿床学研究和矿产勘查开发所必需掌握的基础知识。其研究要点见图 4。

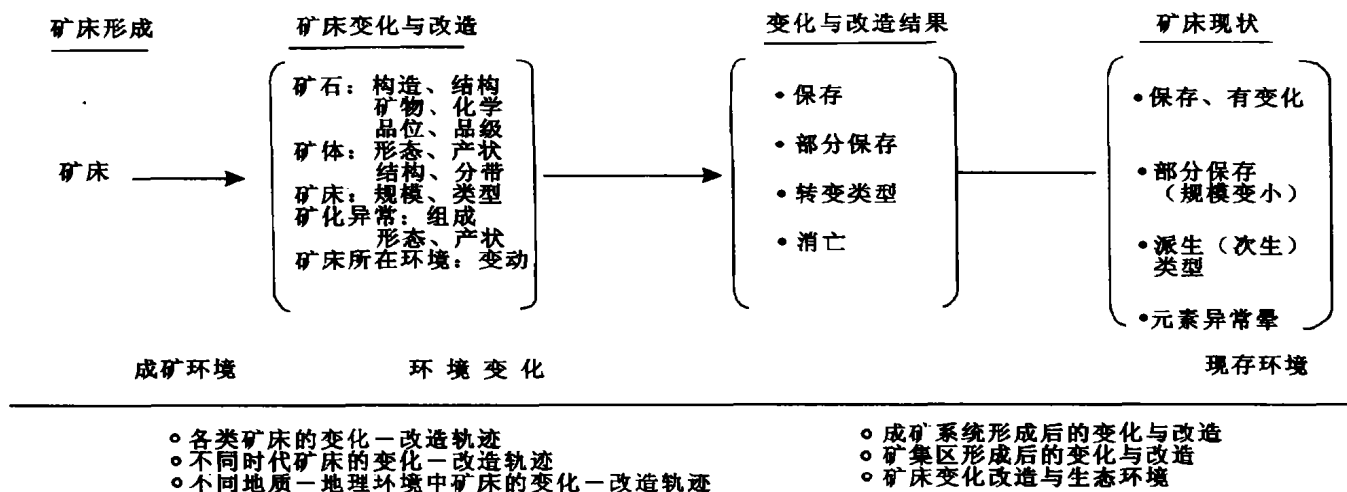


图 4 矿床的形成—变化—保存过程

Fig. 4 Process of the ore formation—change—retention

矿床的类型不同,它们产出的地质—地理位置不同,因而它们经历的变化、改造的过程也有差异。要具体地研究下列内容:①不同类型矿床的变化与保存;②不同地貌、气候条件下矿床的变化与保存;③不同埋藏深度下矿床的变化与保存;④不同地质年龄矿床的变化与保存;⑤矿床变化与异常变化的同步性和因果性;⑥矿床变化、改造的作用过程模型。

3 矿化网络研究

由成矿系统到矿化网络,这是成矿系统研究深入的表现,也是成矿系统应用于找矿预测的一个桥梁。成矿系统理论研究阐明矿床形成的环境、要素、机理、过程、产物及后来的变化,而矿化网络则是在一个成矿系统中形成的矿床和相关异常及其所在环境组成的实体,一般相当于矿集区或矿田的范围。矿化网络是物化了的成矿系统,是可以看得见、摸得着的具体事物,例如,宁芜火山—次火山岩盆地中,在著名的玢岩铁矿系列形成过程中,以含矿辉石闪长玢岩体为核心,发育强烈而广泛的围岩蚀变如钠长石化、阳起石

化、硅化、泥化、黄铁矿化等,以及相应的各类地质异常,构成一个长约 50 km,宽达 12 km 的区域矿化网络^[28]。

矿化网络研究的主要内容包括:①各类矿床的发育程度;②各类矿床的空间关系;③各类矿床的时间关系;④各类矿床的成因联系;⑤各类矿床被改造情况。这些内容在矿床研究和找矿预测工作中经常遇到,有很重要的理论和实际意义。下面分别讨论有关内容:

3.1 成矿系统中各类矿床的发育程度

由于成矿控制因素的多样性,一个成矿系统中可生成几种类型的矿床,但是它们的规模并不一样。有的类型成大矿,有的成小矿,有的则只不过是矿化点。另外,它们的产出数量也不相同,有的矿床类型数量较多,有的类型数量较少。因此,有的矿床类型有重要的经济价值,有的则相对次要。如在铜陵矿集区内发育层控夕卡岩型、夕卡岩型、沉积—改造型以及热液脉型等矿床^[23],其中以夕卡岩型、层控夕卡岩型成矿条件最好,因而该类型铜(金)矿床的储量最丰富;另外两种类型矿床的发育程度则明显不如(表 4)。在区域找矿

评价工作中,认真研究各类矿床在矿化网络中的地位,有利于明确找矿的主要和次要对象。

3.2 成矿系统中各类矿床的空间关系

一个成矿系列中的各矿床形成时存在一定的空间关系:它们或沿某一岩层分布,或围绕某一侵入岩体分布,或沿某一断层带作有序排列。有的矿床在上部,有的在下部;有的在某一地质体内部,有的在其外围。这种多个矿化体(矿床、矿田、矿集区等)在空间的有序分布,一般称为分带性。

矿床的分带性是矿床间关系的一种重要形式,这在传统矿床学中有详细的论述。成矿分带性有不同的尺度。从宏观上分析,区域中的成矿分带性更多地受到矿质来源的控制,与区域地球化学特点有密切关系。而矿床中矿体的分带则更多地受到矿石成分、构造和岩石等因素的控制。

表4 安徽铜陵矿集区各矿床类型的发育程度
Table 4 The ratio of every type of Cu deposits in
Tongling field, Anhui

矿床类型	层控砂卡岩型	砂卡岩型	沉积-改造型	热液脉型 (含角砾岩型)
矿床实例	冬瓜山型	药园山	新桥	东狮子山
铜储量(万吨)	141	92	55	11
所占百分比	47	31	18	4

3.3 成矿系统中各类矿床的时间关系

成矿作用一般延续较长的地质时间,在整个成矿作用过程中常因某个(些)控矿因素的突然(显著)变化而划分为若干个成矿阶段,如在热液成矿系统中常可以分成高温、中温、低温成矿阶段。不同的阶段常形成不同的矿床类型。这样,各矿床之间就有一个时间先后问题,先形成的矿床(体)一般地说占有较多的自由空间,而后来的矿床(体)则往往就位于矿化中心的外围或是偏上偏浅部。例如,经过多个千米以上的钻探查明,在赣东北的德兴—银山矿田内,围绕着一个火山—侵入岩体,较早就位的斑岩型铜矿体就位于中酸性岩体的中心偏上部和岩体边缘,稍后形成的热液脉型 Pb—Zn—Ag 矿床则产在铜矿的偏上偏外部的上覆火山岩层中^[24]。

3.4 成矿系统中各类矿床的成因联系

在一个成矿系统中,各类矿床间的各方面关系以成因关系最为本质。一般认为,在同一成矿过程中形成的,具有全部或部分相同的物质来源

的各矿床之间就是一种成因联系。各矿床的物质来源可以不同,具体控矿因素有不同,但是它们都是在一个统一的成矿作用中产出的,而且在空间上彼此靠近,是一种亲缘关系。

例如,在大庙钼—钛磁铁矿成矿系列中,由初始的斜长岩—苏长岩浆的分异作用而生成的贯入型、浸染型等矿床类型,它们之间就是一种成因联系。

一个成矿系统中各矿床间的成因差别取决于多个因素(岩相、构造、温度、压力及其它)。例如,在统一的成矿作用下,可因构造因素的差别而生成不同类型的矿床,如产于断层中的矿体为矿脉,而产于角砾岩中的矿体则为角砾岩型矿床。再以赋矿岩石的差异为例,产于侵入体与碳酸盐岩接触带的矿床多为夕卡岩型,而产于侵入体围岩砂页岩中矿床则是脉型或网脉型,例如湖南瑶岗仙钨矿床的石英脉型黑钨矿主要产于花岗岩体与砂页岩接触带,而夕卡岩型白钨矿则主要产在碎屑岩和碳酸盐岩中^[22]。

3.5 成矿系统中各类矿床的改造情况

一个成矿系统的矿化网络中各个矿床的被改造情况是不同的。有的矿床由于物化性质稳定或由于所在位置隐蔽而易于保持原封不动;而另外一些矿床或由于物化性质不稳定,或由于所在位置易于暴露而遭到破坏,不易保存。例如,位于宁芜盆地北端的梅山铁矿产在次火山岩体与火山岩接触带上,处在盆地的相对低凹部位,而以隐伏矿形式被完整保存一下来;而位于盆地中部次火山岩体顶部的凹山铁矿则因遭受剥蚀而矿体裸露地表,一部分矿石已被剥蚀。

处在地壳内的矿床,改造它们的因素主要是构造、岩浆、热液等,一般是化学性质活泼的矿床最易被改变,如蒸发盐类矿床和铀矿床等易被破坏。当矿床处在地表或接近地表时,则矿床的分带性即矿床在三维空间中的有序排列,成为矿床是否容易被改变的重要因素。这是因为,风化剥蚀作用使暴露于地表的矿床最先受到破坏,如广义斑岩成矿系统中,斑岩型矿床偏下部,而中低温热液矿脉偏上部,更上部是含 As、Ag 等的泉华。这个矿化网络经过相当的剥蚀(一般 1~3 km)才能使斑岩铜矿接近地表。因此,在矿床预测工作中,既要研究矿床的形成条件,又要研究其破坏、保存条件,这有利于提高找矿的成效。

(第3期待续)

成矿系统研究与找矿

翟裕生

(中国地质大学, 北京 100083)

摘 要:成矿系统研究适应了地球科学系统化的发展趋势,是当今矿床学研究的重要内容之一。本文中对成矿系统的定义、结构、要素、作用产物等进行论述的基础上,提出成矿系统研究的 4 个要点:①按构造动力体制划分成矿系统大类;②多因耦合、临界转换的成矿作用机理;③矿床系列和异常系列构成的矿化网络;④矿床形成变化—保存的演变过程。作者明确了成矿系统研究应从矿化网络入手的方法,总结了矿化网络研究的主要内容,提出了通过成矿系统研究发现新类型矿床的几个途径,分析了成矿系统研究的资源环境效应,并探讨了成矿系统研究的理论意义。

关键词:成矿系统;矿化网络;新类型矿床;资源环境效应

中图分类号:P611

文献标识码:A

文章编号:1672-4135(2003)03-0129-07

(接第 2 期第 71 页)

4 成矿系统研究与新类型矿床的发现

4.1 成矿系统的整体分析:由已知到未知

在一个区域成矿系统中,由于成矿强度较大以及成矿物质和控矿因素的多样性和复杂性,可形成多种矿床类型。例如,在广泛分布的与硅铝质火成岩相关的热液成矿系统中,可产有矽卡岩型、斑岩型、脉型、角砾岩筒型、热泉型等矿床类型。它们都是在一个统一的地质成矿事件中形成的,是矿床系列中的成员,各自占有一定的时空位置和表现出特定的物质组成和结构构造。当已经发现其中的一种或少数几种矿床类型时,可根据成矿系统观点,推断在区域中可能存在的其它相关矿床类型。例如在某地区已发现矽卡岩型矿床,可推测在斑岩体内是否存在细脉浸染型矿床或脉状矿床等,并及时注意这些矿床的找矿标志。如运用得当,则可取得“由此及彼”、“举一反三”找到未知矿床的良好效果。

长江中下游成矿带的 Cu、Fe、Au、S 矿床有多种类型。它们在成矿时间、空间、条件等方面密切相关,是燕山期板内酸性侵入—火山岩成岩成矿事件的统一产物,构成一个成矿系统。其中有些是端元型,有些是过渡型。随着勘查的深入,科技水平的提高,特别是矿床系列和成矿系统思路的建立

和运用,未知的新类型矿床是会逐步发现的。图 5 中以“?”标出的位置,表示在该成矿系统中还可能发现的新类型矿床,其中包括斑岩铜矿系统中的铂族元素矿床、卡林型金矿和岩溶型矿床等。

4.2 成矿系统的空间结构:向深处找寻

在成矿系统的空间结构中,区域矿化分带是主要表现形式^[8],其中矿化垂直分带指矿床物质组成、结构、矿化类型在垂深方向的变化。已有的丰富勘查资料表明,在广泛分布的热液成矿系统中,矿化垂直分带表现比较明显,国内实例有江西德兴银山—铜厂的火山一次火山热液成矿系统分带模式^[22]和闽南紫金山式热液成矿系统分带模式^[23],国外有加拿大西部广义斑岩成矿系统分带模式^[24]等。矿化垂直分带性不仅对已知矿床的深部探矿,而且对寻找新类型矿床也是有意义的,现以铜陵地区狮子山矿田中隐伏的冬瓜山大型矿床的发现为例来说明这一问题。该区成矿系统的一个重要特征是“多层位控矿”即除沿火成岩体边缘成矿外,还在三叠系底部(大团山矿)、二叠系大隆组底部(老鸦岭矿)、石炭系黄龙—船山组(铜官山矿)等层位中发现多层含铜矽卡岩矿层(图 6)。根据这一特点,安徽省地矿局 321 地质队在狮子山矿田中以钻探在 880 米以下发现了厚达 50 米的铜矿层,经过详细勘探,获金属量达 141 万吨的冬瓜山矿床,从而在深部找矿中获得了重大突破^[25]。

收稿日期:2003-01-23

基金项目:国土资源部地质调查项目(K1-4-1-5),中国地质调查局项目(200110200069)

作者简介:翟裕生(1930),男,中国科学院院士,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。

在找寻深部的新类型矿床时,除利用深部地质、地球物理和地球化学的技术和所提供的信息外,还可利用成矿区带中不同区段剥蚀程度差别的对比,利用已出露矿床去找寻邻区尚在隐伏的同类矿床。

4.3 成矿系统的时间结构:查找成矿链条中的缺失环节

在一个大规模成矿事件中,随着成矿系统作用过程中成矿流体性质和控矿构造—岩石因素的变化,矿床类型也发生相应的变化,所形成的多种矿床类型可组成一个较完整的成矿序列(成矿链条),在找矿中可利用已掌握的环节(已知矿床类型)去查找有可能存在而尚未发现的缺失环节(新类型矿床)。这在有关岩浆演化形成的成矿系统中有较多的实例。

在南岭地区花岗类热液成矿系统中,经过对开采矿山的深入研究,发现了有关岩浆与热液过渡型的矿化类型^[26],从而提出了与花岗岩有关

流体系统的较完整成矿序列。即:花岗岩晚期分异型—伟晶岩型—伟晶岩热液过渡型—高温热液型—中(低)温热液型的矿化类型,产有 W、Sn、REE、Bi、Ag、Sb 等矿种。

从区域成矿系统的时间演变分析,还可进一步扩展为研究区域中不同时代成矿系统的继承性和亲缘谱系,即一个或几个矿种,在不同时代中所形成的矿床类型间的亲缘关系。下面依据陈毓川等的工作,以桂北地区的锡多金属矿为例加以说明^[27]。

桂北地区处在扬子陆块与华南褶皱系的交接带,该区存在一个富 Sn 的地球化学块体(四堡群地层及古老花岗岩体中 Sn 丰度较高),由于古老变质基底对成矿的制约作用,以及区域构造—花岗岩浆活动的多阶段性,因而锡元素以不同形式多期次成矿,表现出成矿的继承性,并在燕山期达到高峰(表 5)。成矿时代上的演变还表现为成矿空间的分带性。

表 5 桂北地区锡成矿简表

Table 5 Sn ore-forming in the north part of Guangxi Province

地质时代(Ma)	矿床类型	成矿元素组合
①雪峰期(700 ~ 900)	宝坛电英岩型 九毛锡石硫化物型	Sn、Cu、(B、Pb、Zn)
②加里东期(364 ~ 460)	牛塘界砂卡岩型白钨矿矿床	W、Sn、(Bi、Ag)
③印支末到燕山期(117 ~ 204)	姑婆山砂卡岩、自变质型 珊瑚热液型	Nb、Ta、REE、W、Sn
④燕山晚期(84 ~ 115)	大厂层控砂卡岩型 芒场热液型	Sn、Cu、Pb、Zn、Ag、Sb
⑤第四纪	富贺钟砂锡矿	SnO ₂

据陈毓川等(1995),有简化和补充

该区元古宙及加里东期 Sn 及多金属成矿主要产在变质隆起区,成矿时代较早,矿化类型较为简单。海西、印支、特别是燕山期矿床产在环绕变质陆块的褶皱带沉积岩系与晚期花岗岩的接触带内,矿石组分较为复杂(Sn、W、Nb、Ta、REE、Ag、Pb、Zn、Cu 等)。而花岗岩区原生锡矿石在第四纪时期大量风化剥蚀,又在其下游水系的有利地段形成砂锡矿床,本身既有工业价值,又是找寻原生锡矿床的重要标志。因此,从区域成矿演化谱系的观点,可以将早期的锡—多金属矿床系列与晚期的锡—多金属矿床系列以及砂锡矿床互相作为找矿的标志。

5 成矿系统研究的资源环境效应

5.1 成矿系统研究的找矿意义

成矿系统研究的主要目的是为了预测找矿和资源评价。如何运用成矿理论指导找矿,是大家关心的问题,现提出几点认识供参考:

(1)信息、经验、理论结合找矿:“信息找矿”是利用地质、地球化学、地球物理、遥感、地表矿化等信息作为找矿的依据和标志。“经验找矿”比较强调找矿者找矿经验的重要性。“理论找矿”着重指出地质理论(包括成矿系统、成矿背景、控矿因素、成矿模式等)对找矿的指导意义(图 7)。

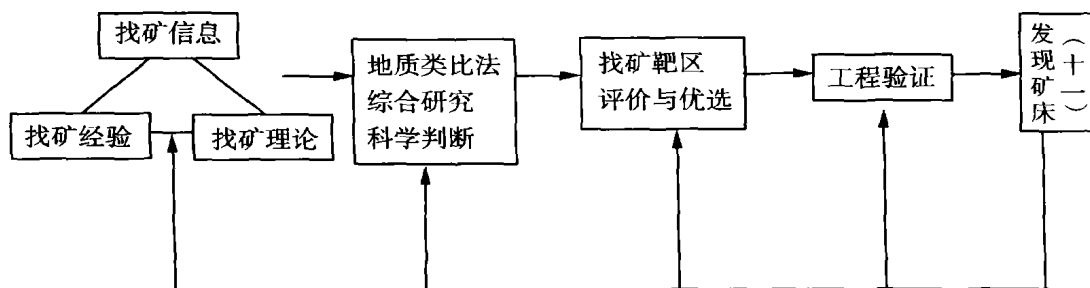


图 7 科学找矿概略模型图

Fig. 7 Compendia model of scientific prospecting

(2) 区域找矿目标——由单个矿床到矿床系列：在过去的找矿工作中，常以单个矿种和单个矿床类型为目标，这在一定程度上限制了找矿者的视野，也造成了有可能避免的浪费。当今，综合性区域矿产调查评价工作正全面展开，找矿的目标就不只限于单个矿种和矿床类型，而应该是找寻该区存在的矿床组合或矿床系列，即由一定成矿系统产生的全部矿种和矿床类型。例如，在长江中下游成矿带找寻 Cu、Fe、Au、Ag、Mo、Pb、Zn 等的斑岩型、矽卡岩型、角砾岩筒型、热液脉型和层控型等矿床。这样以一个成矿系统中所形成的矿床系列(组合)作为找矿的整体目标，有利于建立起区域找矿的战略思路，可以胸有全局、举一反三，线索较多，信息量大，回旋余地也大。这就增强了找矿工作的主动权，与“单打一”的找寻单个矿种和矿床类型来比较，更有利于提高找矿命中率。

(3) 从矿区网络入手逐步缩小靶区：在区域找矿中，一般是先发现示矿异常，再据此追溯矿体。因此，深入研究示矿异常，应该成为区域找矿的一项基本内容。在成矿作用中产生的各类异常，如地质的、地球化学的、地球物理的异常，可直接由矿体因素引起，或由矿化蚀变岩石及含矿地层、岩体、构造等引起。它们在时间、空间和成因上是密切关联的，例如，很多地球物理异常就是由地质和地球化学异常引起的。这些异常伴随着矿床系列在形成时间上常显示阶段性，在空间上组成有序结构，表现为分带性，形成三维的矿化—异常网络或称矿化网络(包括矿床、矿点和各种异常)。而这种矿化网络正是进行区域找矿的总体对象。由于示矿异常一般比矿体占有更大的空间，能显示更多的有关成矿的信息，因此常是有效的找矿标志。充分运用地质成矿

理论，区分和筛选这些有关异常，一步步地缩小找矿靶区，可以达到发现矿床的目的。

(4) 全面研究矿床形成条件和保存条件：矿床是地质历史的产物，成矿系统作用过程结束后，所产生的矿床系列及异常系列又进入一个新的历史阶段，即这些产物经受后来地质作用的变化和改造的阶段。主要的地质改造作用有构造变形、流体溶蚀、变质作用和地表风化剥蚀、搬运和掩埋作用等。作为一个矿床，其经受的后来变化有变形、变质、变位、变品位、变规模等，其结局有几种可能：①保存完好；②部分保存，即矿床规模缩小；③转变为其它类型(如岩金矿转变为砂金矿)；④消亡。目前，已知的地表和近地表的很多矿床都是经过众多地质事件磨难后的“幸存者”。一个区域中的矿床“幸存者”越多，找矿的潜力就越大。因此，区域成矿研究应该“两手抓”，既要研究矿床形成条件，又要研究矿床保存条件。即矿床保存条件研究不是附带任务，在大多数情况下，它是一项并不亚于成矿条件研究的重要内容。扩展来说，不仅研究单个矿床的破坏保存，还要研究一个成矿系统产生的矿床组合和异常系列的被改造过程和整体保存条件，包括哪些矿床类型被破坏了，哪些被保存下来，保存在哪些地段？等等，这对于区域矿产资源评价具有重要意义。关于成矿系统的研究和找矿的关系参见图 8。

5.2 成矿系统研究的环保意义

新世纪的矿业既要提供足够的矿产资源，又要在开发利用资源的过程中保护好环境，这就对矿床学研究提出了更高的要求^[20~22]。矿床地质工作者要为发展低能耗、无废物、高效益、无污染的“绿色矿业”发挥其应有的基础作用。也即矿床学研究不仅要“瞻前”(矿床的形成环境、条

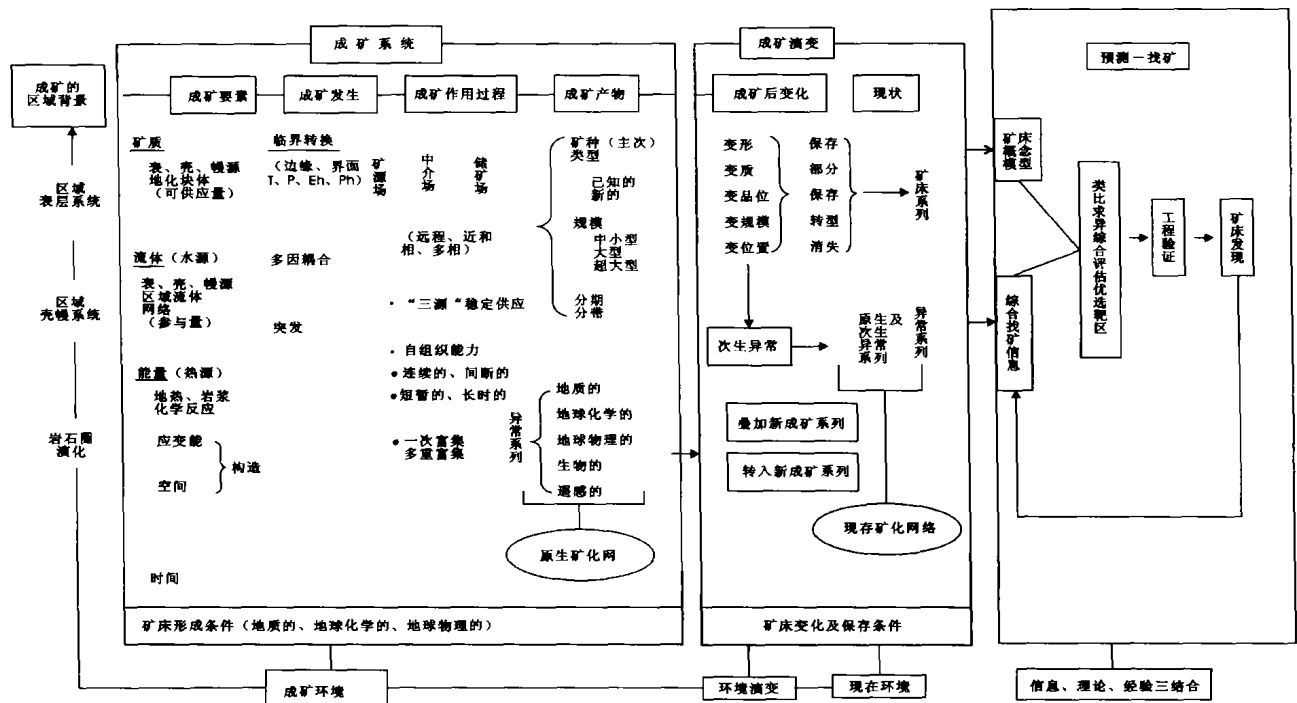


图8 区域成矿系统及找矿模式

Fig. 8 Regional ore-forming system and ore-hunting model

件和作用过程)、“知今”(矿床地质特征及现有环境),还要“顾后”(矿床开发过程及以后诱发的生态环境地质问题)。面临着矿区环境保护问题,可以从多方面探索解决的途径。本文中试图从成矿系统的角度,对成矿与环保二者的结合研究提出一些思考。总的想法是:成矿系统研究不仅要为找矿评价服务,也要为矿床环境质量评价和实施矿业环保提供科学的基础资料。作者认为,为了服务于环保,成矿系统研究可突出下列内容:

(1)矿床的物质成分:研究矿石中的有害组分,特别要查清对人畜有害的元素如 S、Cd、Hg、As、U 等的含量、赋存状态,以及它们在矿床开发过程中的化学变化和扩散途径等,并提出处理这些有害物质的技术方案,主要是参与革新采、选、冶和环保技术,将有害物质变为无害或有用物质。

(2)矿床构造及矿体产状:矿体及围岩的组成、形态、产状、断层、裂隙和孔隙发育程度等,既控制矿区地表水和地下水的运动方向、速率和水/岩反应强度,又与采矿过程中的地面沉降、滑

坡、地震等灾害密切相关。

(3)矿床的表生变化特征及其环境影响:依据矿床地质特征及所在地的地理、气候等条件,研究矿床自然暴露地表或开采出露后遭受表生作用变化及可能诱发的污染现象和机理,区别短期影响因素和长期影响因素,提供整治矿山及毗邻地区生态环境的地质依据。

上列的地质因素,归根到底都是由于成矿控制因素、成矿作用、矿床地球化学和成矿后矿床的变化改造所引起的。这也正是成矿系统研究中必不可少的内容。

如前所述,成矿系统的研究对象主要是区域尺度的矿床形成和分布,因此成矿系统研究不只对单个矿区的环保工作有益,还能为成矿区带和矿业发达区的区域环境质量评估、发展趋势预测以及区域环保规划提供必需的地质资料,而且这种“宏观”上的研究意义将日显重要。

总的来说,成矿系统研究对矿区环境保护的意义还只是初步提出,需要在实践中不断丰富研究内容和提高理性认识。成矿系统研究的资源、环保效应可概括如图9。

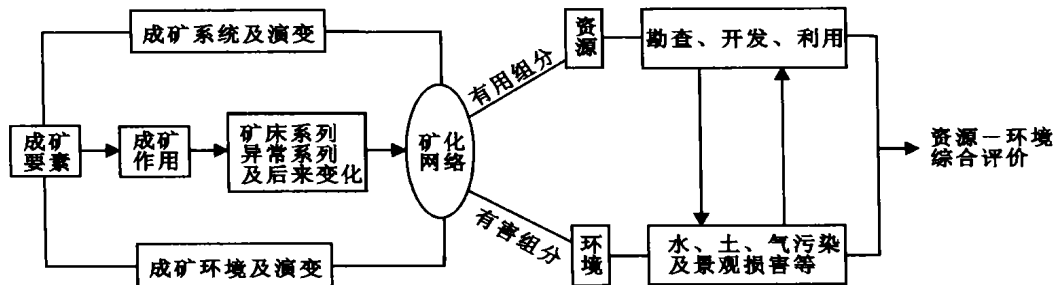


图 9 成矿系统研究的资源环境效应

Fig. 9 Resources and environment effect of studying ore-forming system

6 成矿系统研究的理论意义

(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物质而变成了贵重的宝藏。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。例如, 南非古元古宙含金铀砾岩型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。类似这样的例子很多, 但在过去, 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及其它学科的研究中去, 这对于整个地球科学的发展是不利的。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。

总之, 成矿系统研究的理论和方法, 体现了现代矿床学和矿产勘查要理论与实践密切结合

的发展趋势。以系统观和历史观为研究思路, 以资源勘查和环境保护为服务目的的成矿系统研究尽管目前还处在初步阶段, 但它发展的前景是非常喜人的。

参考文献:

- [1] Геологический словарь [J]. Том. 2, М. недр, 1973, 448.
- [2] вищарапов. Развитие Эндогенных Флюидных Рудообразующих Систем [J]. Новосибирск НАУКА, 1992, 47 - 48.
- [3] Jacques, A. L. The role of GIS, empirical modeling and exert system in metallogenic reseaech [J]. GSA, Abstract NO. 37, 1994, 196 - 197.
- [4] 於崇文. 成矿作用动力学—理论体系和方法论 [J]. 地学前缘, 1994, 1(3): 54 - 82.
- [5] 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 等. 成矿作用动力学 [M]. 地质出版社, 1998, 1 - 23.
- [6] 李人澍. 成矿系统分析的理论与实践 [M]. 北京: 地质出版社, 1996, 19 - 20.
- [7] 翟裕生. 成矿系统的结构框架和基本类型 [A]. 中国可持续发展的资源环境科学学术讨论会论文集 [C]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [8] 翟裕生. 论成矿系统 [J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 13 - 28.
- [9] 陈毓川, 裴荣富, 宋天锐. 中国矿床成矿系列初论 [M]. 北京: 地质出版社, 1998, 63 - 75.
- [10] 孙启祯. 边缘成矿与成矿边缘效应 [J]. 地学前缘, 1994, 1(4): 176 - 183.
- [11] 孙启祯. 边缘成矿概论 [M]. 北京: 地质出版社, 2001, 1 - 158.
- [12] 李兆鼎. 火山岩和相关侵入岩地区金矿的形成机制——内外多元耦合、四维局部富集成矿 [J]. 地球科学, 1997, 22(3): 268 - 274.
- [13] 涂光炽, 赵振华, 刘秉光, 等. 庞然大物——与寻找超大型矿床有关的基础研究 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版

- 社, 1995, 1-116.
- [14] 涂光炽. 试论非常规超大型矿床物质组成、地质背景、形成机制的某些独特性——初谈非常规超大型矿床[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(Supp.): 1-6.
- [15] 徐光炽, 等. 中国超大型矿床[M]. 北京: 科学出版社, 2000, 1-584.
- [16] 翟裕生, 邓军, 丁式江, 等. 关于成矿参数临界转换的探讨[J]. 矿床地质, 2001, 20(4): 301-306.
- [17] 邓军, 吕古贤, 杨立强, 等. 构造应力场转换与界面成矿[J]. 地球学报, 1998, 19(3): 244-250.
- [18]. 邓军, 孙忠实, 王建平, 等. 动力系统转换与金成矿作用[J]. 矿床地质, 2001, 20(1): 71-77.
- [19] 於崇文. 地质作用的自组织临界过程动力学——地质系统在混沌边缘分形生长[J]. 地学前缘, 2000, 7(1): 13-42.
- [20] 於崇文. 成矿动力系统在混沌边缘分形生长——一种新的成矿理论与方法论[J]. 地学前缘, 2001, 8(3): 9-28.
- [21] 翟裕生, 邓军, 彭润民. 矿床变化与保存的研究内容和研究方法[J]. 地球科学, 2000, 25(4): 340-344.
- [22] 黄世全. 赣东北火山—斑岩铜多金属矿床的成因模式[A]. 中国地质学会. “七五”重要科技成果学术交流会论文集[C]. 北京: 科学技术出版社, 484-489.
- [23] 翟裕生, 姚书振, 崔彬. 成矿系列研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996. 84-88.
- [24] MacIntyre D. G. Sedex—sedimentary—exhalative deposit, ore deposits, tectonics and metallogeny in the Canadian Cordillera[J]. Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, British Columbia, Queen's prer for British Columbia, Victoria, 1995, 5-20.
- [25] 中国矿床发现史·五徽卷编委会, 中国矿床发现史·安徽卷. 地质出版社, 1996, 83-86.
- [26] 林新多. 岩浆—热液过渡型矿床[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999. 1-8.
- [27] 陈毓川, 毛景文. 桂林地区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. 410-413.
- [28] 中国矿床编委会. 中国矿床·中册. 北京: 地质出版社, 1994, 33-40.

Research on Metallogenic System

ZHAI Yu - sheng

(School of Earth Sciences and Resources, China university of Geoscience, Beijing, 100083)

Abstract: The research on metallogenic system meets the trend of systematization of Earth sciences. It becomes one of the most important research contents of ore deposit geology. Based on the study on the concept, structure, elements and products of the metallogenic system, the author emphasizes four main points in the research of metallogenic system. (1) Major types of metallogenic system are classified by tectono-dynamic system; (2) Coupling of many factors and criticality-transition are basic ore-forming mechanism; (3) Ore deposit series and anomaly series constitute the mineralization network; (4) The evolutionary process of an ore deposit includes its formation, transformation, and also preservation. In addition, the author puts forward that research of metallogenic system should start from the study of mineralization network. Main contents of research on mineralization network are summarized and several ways to discover new-type of ore deposits with the research of metallogenic system are pointed out in this paper. Finally, effect on mineral resource and environmental protection and theoretic significance of the research on metallogenic system are discussed.

Key words: metallogenic system; mineralization network; new-type of ore deposit; effect on mineral resources and environmental protection