

矿床成矿系列

——五论矿床的成矿系列问题

陈毓川¹⁾, 裴荣富²⁾, 王登红²⁾, 黄凡²⁾

1)中国地质科学院, 北京 100037;

2)中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

摘要: 矿床的成矿系列(简称成矿系列)是矿床学领域的一个理论性概念, 由五级序次组成。矿床成矿系列是成矿系列的第二序次, 是成矿系列的核心部分。矿床成矿系列的划分, 以岩浆、沉积、变质、表生和流体(非岩浆-非变质成因流体)5种成矿作用为基本原则, 以成矿地质环境为基础, 结合成矿的时段与形成的矿床组合进行划分。本文对矿床成矿系列时空范围、时空组成结构、矿化强度与演化、成矿区带内不同矿床成矿系列之间的演化、叠加和复合作用及对指导找矿的意义进行了论述。

关键词: 矿床成矿系列概念; 划分原则; 时空圈定; 组成与演化; 找矿意义

中图分类号: P612; P611.5 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2016.05.02

Minerogenetic Series for Mineral Deposits: Discussion on Minerogenetic Series (V)

CHEN Yu-chuan¹⁾, PEI Rong-fu²⁾, WANG Deng-hong²⁾, HUANG Fan²⁾

1) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resources Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: Minerogenetic series of mineral deposits (metallogenic series for short) is a theoretical concept in the field of mineral deposits, which can be divided into five orders by ore-forming sequence. As the second order, minerogenetic series for mineral deposits serves as the core of the components of minerogenetic series. According to the mineralization of magma, sedimentation, metamorphism, supergene and non-magmatic and non-metamorphic ore forming fluid, minerogenetic series for mineral deposits can be divided based on metallogenic geological environment in combination with the ore-forming period and the existence of deposit combinations. In this paper, the spatial-temporal range, composition structure, mineralization intensity and evolution of minerogenetic series for mineral deposits as well as the evolution, superposition and recombination between different metallogenic series for mineral deposits and their significance for guiding prospecting are discussed.

Key words: concept of minerogenetic series for mineral deposits; classification principles; spatial-temporal delineation; composition and evolution; prospecting significance

成矿系列是矿床地质科学中研究区域成矿规律的一种学术思想(概念), 用系统论、活动论观点研究在地质历史各阶段、各特定地质构造环境中的成矿作用过程及形成的矿床组合自然体(程裕淇等, 1979, 1983; 陈毓川等, 1998, 2006, 2015a)。成矿系列亦是一种矿床的自然分类(陈毓川等, 2006, 2015a)。自成矿系列概念提出以来的37年(1979—

2016)中, 以此概念为指导, 在全国各省、自治区、直辖市、重要成矿带均开展了大量区域成矿规律研究(陈毓川, 1983, 1994, 1997; 陈毓川等, 1985, 1989, 1993, 1995, 2007, 2014, 2015b; 翟裕生等, 1992, 1996; 裴荣富等, 1998; 王平安等, 1998; 罗铭玖等, 2000; 王登红等, 2002; 彭翼和何玉良, 2015; 于学峰等, 2016), 提升了我国区域成矿规律的研究程度

本文由中国地质调查局中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务(矿产地质志)项目(编号: DD20160346)资助。

收稿日期: 2016-08-12; 改回日期: 2016-09-01。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 陈毓川, 男, 1934年生。研究员, 博士生导师, 中国工程院院士。主要从事区域成矿学研究。E-mail: chenyu@cags.ac.cn。

及水平,在指导找矿工作中起到了积极作用。同时进一步完善了成矿系列概念的理论体系,提出成矿系列体系由五个序次组成(陈毓川等,2006):第一序次为矿床成矿系列组合、矿床成矿系列组和矿床成矿系列类型,第二序次为矿床成矿系列,第三序次为矿床成矿亚系列,第四序次为矿床式,第五序次为矿床。其中,第二序次矿床成矿系列是核心部分。本文对此做进一步剖析。

1 矿床成矿系列的形成与含义

矿床成矿系列是在地球存在的历史中,特定时空域内形成的有成因联系的矿床组合自然体(陈毓川等,2006)。每一个矿床成矿系列均是地球存在的时空域中唯一的一个不可分割的实体,由四个要素组成:特定的时间段、特定的地质构造环境、特定的成矿作用和由此形成的矿床组合自然体(图1),是同时段、同地质构造环境、同成矿作用下形成的有成因联系的矿床组合自然体,是全球矿床世界中的基本组成单元——“细胞”。

2 矿床成矿系列的划分

在一个区域内,某一时段的地质构造环境和已发现的各类矿床是识别和划分出矿床成矿系列的基础。通过调查、分析、研究确定与各类矿床形成有关的主要成矿作用的类别,此成矿作用在区域地质构造活动中所处的时、空部位及与哪一类地质作用(沉积、岩浆、变质、表生、断裂褶皱构造等)有关。在识别出同时段内成矿地质构造环境、成矿作用与有关矿床的内在联系的基础上,按形成矿床成矿系列的四要素(时、空、作用、矿床组合)提出本区存在的矿床成矿系列。因此,在一定的时间段内,划分出矿床成矿系列,地质构造环境及形成此环境的地质作用是基础,地质作用中的成矿作用是关键,而矿床组合自然体是必然产物。

对同一时间段内成矿地质环境及地质作用、成矿作用和同时形成矿床的正确识别,必定存在不同程度的问题,关键是区别开在本地区存在的其他重

要时段的地质构造环境、地质作用,有时尚有成矿作用及形成的矿床组合,即有另一时段矿床成矿系列的存在。这方面的识别程度取决于本区内研究程度,因此要充分收集、应用本区内地质调查、勘查及科学研究成果。如果条件允许,应补充关键性野外样品采集,开展样品鉴定、分析测试工作。在此基础上,加以分析、研究,做出相对合理的判断,区分开在同一区域内不同时段、不同地质环境中可能存在的另一个矿床成矿系列。

2.1 成矿地质环境和成矿时段的确定

矿床成矿系列所在成矿地质环境通常是大地构造旋回活动过程中所形成相对独立的Ⅲ级成矿地质构造单元,如长江中下游构造岩浆成矿带、阿尔泰成矿带,或特殊的构造单元,如形成金刚石矿的深断裂带。但矿床成矿系列空间范围及其边界只能是相对的,与成矿作用涉及的范围一致。目前能识别的范围只能是与成矿作用有关的矿床、矿点、矿化点分布的范围,以及远景预测的可能范围,一般限定在Ⅲ级成矿带内,亦可出矿带,因为成矿区带的划分也是相对的。

矿床成矿系列形成的时间段应是成矿地质环境形成、演化过程中出现与成矿作用有关的地质作用活动时段,如长江中下游地区中生代地质构造活动从印支期已开始,而与成矿有关的构造岩浆活动是在燕山中、晚期,因此,此矿床成矿系列的时间段应是燕山中、晚期。

2.2 成矿作用类别的确定

矿床成矿系列划定的最关键因素是成矿作用,我们采纳了传统的三大类成矿作用:岩浆成矿作用、沉积成矿作用和变质成矿作用。考虑到成矿条件及成矿作用性质的不同,从传统的沉积成矿作用中分出了表生成矿作用(指在地表大气圈范围内风化淋滤等物理、化学、生物作用有关的成矿作用)作为独立的一类,而沉积成矿作用限于在水体中的成矿作用。另外,新增加了一类在地壳中与岩浆、变质作用无关的流体成矿作用,一般是中低温的含矿流体成矿。最典型的例子是砂岩型铀矿的形成。因此,成矿作用可以分成五类,矿床成矿系列因成矿作用的不同亦可分为五类,并相应组成五类矿床成矿系列组合。

不少矿床成矿系列不是单一的成矿作用所形成,如火山-沉积类矿床,既有岩浆作用又有沉积作用;深部流体类沉积矿床,如贵州的锰矿、重晶石矿等,既有深部流体作用,又有沉积作用;沉积-变质类矿床,既有沉积作用又有变质作用等。在这种情况下,应列入主要的成矿作用类中,其他的成矿作用所起作用作必要论述。因此,岩浆作用为主提供成矿物质的都归入岩浆成矿作用类,火山-沉积

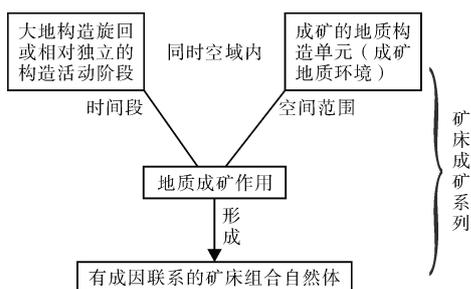


图1 矿床成矿系列组成结构

Fig. 1 Composition structure of minero-genetic series for mineral deposits

作用应归入此类;深部流体成因尚不明而在水体中沉积产出的矿床就归入沉积作用类;有变质作用涉及的矿床均归入变质成矿作用类。

矿床成矿系列的划分有赖于工作程度和认识水平,随着研究程度的提高,需要不断完善,不断接近客观实际。

3 矿床成矿系列的内部组成结构

受各自的成矿因素控制,地球上的矿床成矿系列各不相同,体现在各矿床成矿系列的成矿强度、成矿物质组成、内部组成结构及各因素演化等多方面。而这些内部组成互为关联,是一个整体。

3.1 成矿强度

矿床成矿系列的成矿强度体现在形成矿床的数量及涉及的时空范围上,按产出数量可分为超强、强、中、弱四个强度等级。建议超强强度的矿床成矿系列有5个以上超大型矿床或30个以上大型矿床产出;强的有2个以上超大型矿床或10个以上大型矿床产出;中的有5个以上大型矿床产出;弱的有5个以下大型矿床产出。矿床成矿系列所属时空范围的大小往往与成矿强度呈正相关。

3.2 成矿物质的组成

成矿物质的组成对不同的矿床成矿系列差别极大,决定于成矿地质环境、成矿作用类别,有由单一的元素形成的单矿种矿床,如金刚石矿床的成矿系列,成矿时段较短,涉及范围亦较小;亦有数十种成矿元素组成的多矿种矿床,如南岭地区燕山期与花岗岩有关的有色、稀有、稀土、贵金属、铀矿床成矿系列(简称南岭矿床成矿系列),其成矿时段从印支期延续至喜山期,成矿涉及地域超过200 000 km²;而大部分矿床成矿系列的物质组成是处于这两种端元状况之间。

较普遍存在的规律是,在成矿过程中及分阶段成矿过程中成矿元素常以共生组合形式出现,如岩浆成矿作用过程中,Cu-Au、Cu-Zn、Cu-Mo-Ag(Au)、W-Sn-Bi-Mo、Cu-Pb-Zn(Sb)、Pb-Zn-Ag-Sb-As-Hg、Fe-Ti-V-P、W-Sb-Au等矿种组合。各矿床成矿系列所具有的成矿元素构成的矿种组合,一般是有序地先后产出,并有序分布。这与成矿源的成矿专属性和有规律演化有关。这里提出的成矿源是指形成与聚集成矿物质的源地。对岩浆成矿作用来说,可以是地壳熔融地、壳幔混合地和地幔的矿源地。各成矿源均具有成矿元素组合的专属性,随着成矿源的演化分阶段输出一定成矿元素组合的成矿气、液、浆,在特定的构造部位成矿(陈毓川等,2014)。很多矿床成矿系列的成矿物质来自同一个成矿源,但有些矿床成矿系列成矿物质可以来自不同的成矿源,

它们在同一地质构造环境、同一时段内并存,如长江中下游燕山期与岩浆成矿作用有关的铁、铜、金多金属、非金属矿床成矿系列(简称长江中下游矿床成矿系列),就是由以铜、金组合为主体的与以铁、磷组合为主体的两种成矿源,在同一时段内,先后在不同的次级地质构造环境中成矿,前者在晚古生代地层隆起地段,后者在晚古生代地层下陷侏罗—白垩纪火山活动地段,成矿都与地幔作用有关,但应属于由不同壳幔作用形成的成矿源。

3.3 矿床成矿系列的内部组成结构

矿床成矿系列的内部组成结构决定于在此时段内地质构造活动及相关的成矿作用,体现在成矿的阶段性、成矿的集中性和成矿的分带性。

3.3.1 成矿的阶段性

成矿的阶段性对岩浆成矿作用的大部分矿床成矿系列都有体现,受区内构造岩浆活动控制。在形成矿床成矿系列的时段内,在不同地段发育各有特色的阶段性的构造岩浆成矿作用,先后在不同地段形成不同成矿强度、各有特色的矿床组合,但这些地段形成的矿床组合是属同一类成矿作用的产物,在矿床的矿物组成、成矿物化条件都有继承和演化的内在联系,按其形成的先后及所处的不同地段,有的分别可构成矿床成矿亚系列,同时亦形成矿集中心。一个矿床成矿系列就是由亚系列和矿集中心内的矿床组合所构成。

3.3.2 成矿的相对集中性

形成矿集中心是矿床成矿系列及亚系列内较普遍存在的一种成矿结构。围绕矿集中心通常形成规模不等的矿床相对集中的矿田。在矿田内的矿床群体可由一种或多种矿床类型(其代表性矿床命名为矿床式)的矿床组成。各类矿床式在时空分布上通常具有一定规律。

成矿在地域上的集中性决定于深部成矿源的位置。阶段性的构造运动形成局部与成矿源沟通的通道,引起成矿源成矿物质的上涌,进入上部地壳,形成岩浆成矿活动中心,围绕成矿岩体产出各类矿床,或成矿流体分期涌入与深断裂交叉的断裂网或有利地层褶皱构造,尤其是推覆构造、层间错动构造中产出各类矿床。通道不可能到处都有,受深部与表层构造的控制,但可多次活动,多次成矿,可以形成一定量的矿集中心。

沉积成矿形成的矿床成矿系列则表现在一定时段内、一定范围内的成矿沉积环境中集中成矿。

3.3.3 成矿的分带性

矿床成矿系列内成矿的分带性是一个重要结构,其成因与成矿地质环境有规律活动与变化、成矿作用的阶段性、成矿物质组合在成矿过程中的演

变性、成矿活动的集中性有关。

成矿的分带性以其空间展布状况又可分为区域性分带、矿田内分带及矿床内分带。

(1) 区域性分带

区域性分带是与成矿亚系列的分布基本一致,如阿勒泰地区海西期与岩浆成矿作用有关的铁铜多金属、金、镍、稀有矿床成矿系列从北向南分出了:早期的海相火山岩型铁、铜、铅、锌、金矿成矿亚系列;早中期的伟晶岩型锂、铍等稀有矿成矿亚系列;中晚期锡、铜、金矿成矿亚系列、金矿成矿亚系列与铜镍矿成矿亚系列的区域成矿分带(王登红等, 2002)。

一般成矿强度大,时空分布范围大的矿床成矿系列在自身演化过程中形成多个亚系列,构成区域性成矿分带较为常见,并且分带通常具有规律性,有的成带状分布,有的成区分布,空间上有方向性的排列,时间上有相对前后;有的矿床成矿系列成矿强度小,成矿组合较单一,区域性成矿分带就不明显,分不出亚系列。

(2) 矿田内分带

矿田内的分带与成矿活动中心范围内的成矿作用有关,通常围绕深部成矿通道有关的成矿中心,各类矿床具有一定规律的时空分布,而矿田本身就是矿床成矿系列和亚系列的组成部分。如长江中下游矿床成矿系列中的宁芜火山盆地的成矿亚系列就有三个成矿中心形成的三个矿田(《宁芜玢岩铁矿》编写组, 1978): ①北东部梅山铁铜(磷)矿田,以火山岩浆活动中心辉长闪长玢岩次火山岩体顶部梅山式矿浆类型为主的矿床为中心,外围有吉山式岩体中热液交代型透辉石、方柱石磁铁矿矿床,岩体与三叠纪碎屑岩为主地层接触带有麒麟山式热液交代型赤铁矿为主的铁矿床,外围有安基山式斑岩型铜钼矿床等; ②中部凹山铁、硫(明矾石)矿田,以凹山火山活动中心辉长闪长玢岩次火山岩体顶部的角砾状、网脉状阳起石(透辉石)-磁铁矿-磷灰石凹山式铁矿为中心,其周围在岩体内有陶村式热液交代钠长石(方柱石)磁铁矿床、在岩体外围火山岩中有东山式高温气液充填产出的伟晶磷灰石、阳起石(透辉石)、磁铁矿环形脉状矿床、在岩体与火山岩接触带有向山式黄铁矿床等; ③西南部钟姑山铁矿田,以火山岩浆活动中心辉长闪长玢岩顶部姑山式矿浆型铁矿为中心,周围有岩体与三叠纪砂页岩、灰岩地层接触部位形成的白象山式热液交代型云母-阳起石-磁铁矿矿床。矿田之间相距 20~30 km, 之间地域内成矿较弱。

各矿床成矿系列及其亚系列内矿床可以矿田形式相对集中产出,受同一成矿活动中心的控制,

但与深部成矿源沟通的成矿活动中心的成矿强度、成矿物质组成是多变数的,有的可以形成矿集中心不同规模的矿田,有的形不成矿田,有的可半途折腰。因此,在矿床成矿系列及亚系列内矿床可以矿田形式集中产出,亦可分散产出。但都与地壳浅、深部的各类控矿构造相关,都是由各类矿床式的矿床所组成。

(3) 矿床内分带

矿床内的成矿分带普遍存在,受成矿过程中成矿流体性质的演变、成矿构造部位、围岩物理、化学环境影响及成矿期内构造岩浆活动的控制,可表现为多种形式,以某些岩浆成矿作用产出的矿床为例:罗马尼亚喀尔巴阡山区,与中酸性岩浆活动有关的一些铜、铅、锌、金、银矿床,可见到有的脉状矿体从下向上由铜(铅锌)—铅锌(银)—银、金的分带,成矿温度是下降的正向分带(程裕淇等, 1983);而在江西南部,与黑云母花岗岩有关的钨矿床内黑钨矿-(长石)-石英脉矿体中,早期高温形成的钨锡等氧化物矿上、下都有,上中部有富集段,晚期以中温为主,形成的硫化物铜、铅、锌矿在中下部产出为主,呈现明显的逆向分带(陈毓川等, 1989);日本海相火山岩型黑矿具有顶部硅质带、重晶石带、上部黑矿带(黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等),中部黄矿带(含铜黄铁矿带),下部硬石膏带的分带性(程裕淇等, 1983);我国的新疆阿舍勒海相火山岩型铜矿具有上部重晶石带,主体是层状铜锌硫化物矿层,下部是网脉状含铜黄铁矿为主的矿体;与中酸性岩浆岩有关的矽卡岩-斑岩型铜钼多金属矿床,常见斑岩体中斑岩型铜(钼、金)矿体或钼矿体,岩体与围岩(灰岩)接触带的矽卡岩型铜矿体或铜、铅、锌矿体,外围围岩中铅、锌、银矿脉状矿体(王登红, 1995);与花岗岩有关的广西大厂长坡—铜坑锡石-硫化物多金属矿床,底部 92 号矿体在硅质岩带中似层状细网脉状锡石-铅锌黄铁矿体,之上 91 号矿体在条带状灰岩中,以交代灰岩条带为主形成条带状层状矿体,由锡石-闪锌矿-毒砂-磁黄铁矿-电气石-透长石-石英组成,中部细脉带矿体,上部大脉带矿体。此处分带是由构造、围岩结构与岩性、矿液的自下向上定向流动综合因素造成,是在一个倒转背斜上横向小背斜内,层间错动,矿液沿层间交代充填形成似层状矿体,层间错动带上部形成的羽状裂隙被矿液充填形成细脉带矿体,横向小背斜轴部张性构造带矿液充填形成了大脉带矿体。交代产出矿体内缺氧形成磁黄铁矿,网脉及大脉中富氧,矿液充填产出形成的是黄铁矿与白铁矿。在这些矿体内部都有晚期低温的辉锑矿-石英-方解石细脉分布,因为在矿体上部有百余米厚的页岩覆盖。地层褶皱、层间

错动形成的不同张性裂隙未能透入上部页岩盖层, 因此多阶段的高、中、低温矿液形成的不同矿物组合的矿体均叠加在一个空间内。上部大脉矿体中中低温阶段的矿物组合更多一些(陈毓川等, 1985, 1993)。

总之, 矿床成矿系列的内部组成结构, 表现为当出现有规律地、阶段性区域成矿时, 形成矿床成矿亚系列, 空间上形成成矿亚带, 相当于IV级成矿单元; 在矿床成矿系列或亚系列分布区域内, 受各类成矿因素控制, 成矿通常集中在某些构造-岩浆岩或沉积相部位, 形成矿集中心(矿田或矿集区), 相当于V级成矿单元; 成矿分带是矿床成矿系列所属各实体的普遍结构。矿床成矿系列内部组成结构见图2。

4 矿床成矿系列的演化、叠加与复合

4.1 矿床成矿系列的演化

从地球本身46亿年来各圈层的物质组成及结构演化, 明显造成从老到新的矿床成矿系列在成矿物质组成及矿床类型上的演化。总的演化趋势是早期以幔源成矿物质为主, 成矿元素组合较为简单, 矿床类型亦较少, 之后壳源成矿物质逐渐增加, 成矿元素组合日益复杂, 矿床类型越来越多(陈毓川等, 1998)。如太古宙—早元古代时期矿床成矿系列以火山-沉积型铁(金)矿为主, 形成铁矿大时代; 中、新生代的矿床成矿系列成矿元素组成复杂, 铁已不是主要的矿产, 铜、铅、锌、铋、汞、钨、锡、铍、钼、银、金、铀、铌、钽、稀土、铁、铬等都可成矿, 尤其是钨、锡、铋、钼、铜、铅、锌、铋矿更为突出, 与壳源成矿物质关系更为密切。成矿类型比太古宙、元古宙时期的大为增加。因此, 矿床成矿系列的物质组成及成矿类型在地质时代中的规律性演化受控于地球本身的演化, 二者内在紧密相联。

在有的地区存在早、晚不同期形成的矿床成矿系列在成矿物质组成及矿床类型上有继承性, 成为地区性的成矿专属性。桂北地区有新元古代雪峰期与花岗岩有关的锡、钨、铜、铅、锌、铋矿的矿床

成矿系列, 如宝坛地区的一洞、九毛等锡石硫化物矿床; 有加里东期的与花岗岩有关的钨锡多金属矿床成矿系列, 如牛塘界钨矿床; 有燕山期与花岗岩有关的锡、钨多金属、稀有矿床成矿系列, 如广西大厂锡石多金属矿床、栗木钨锡铌钽矿床、珊瑚钨锡多金属矿等(陈毓川等, 1995)。在新疆阿勒泰地区加里东期、海西期、印支期和燕山期形成的各个矿床成矿系列中均有伟晶岩型稀有、云母矿床的产出, 但加里东期以白云母为主, 印支期和燕山期以综合性稀有金属矿床为主, 海西期则二者兼有, 并随着从早到晚, 伟晶岩的分带性越来越清晰, 成矿强度越来越大, 成矿元素组合也越来越复杂(王登红等, 2004)。这类地区性矿床成矿系列的继承性与不同时期出现同类地质构造环境及早期成矿物质重熔再成矿有关。

4.2 矿床成矿系列的叠加与复合

4.2.1 不同时期矿床成矿系列的叠加与复合

不同期的矿床成矿系列在空间上叠加, 成矿作用上的复合在多旋回成矿的成矿区带中是常见的, 对我国来说, 这是区域成矿的一大特色。我国板块间北部的天山—北山—华北地块北缘构造成矿带、中部的大别—秦岭—祁连—昆仑构造成矿带及西南部的三江构造成矿带, 都是属于多构造旋回、多期成矿, 多期矿床成矿系列产出最强烈的地带。多期矿床成矿系列之间时空及相互作用的关系出现两种情况: 第一种情况是最常见, 是在一个成矿带内不同期次的矿床成矿系列出于各自受控的构造带内, 有时不同时期的成矿构造带有所重叠交叉, 但矿床间没有发生晚期改造早期的状况, 仅是在成矿带内叠加而已。不同期次的矿床成矿系列有时在矿床组合的组成上有相似之处, 在这种情况下, 应从各期成矿系列的成矿地质环境、矿床组合内在联系和成矿蚀变围岩、矿石矿物必要的测年来区分相对独立的矿床成矿系列, 并研究他们各自形成的成矿地质环境、成矿作用, 探讨他们之间的内在联系。

另一种情况是形成后期矿床成矿系列的成矿作用对早期的矿床进行了改造, 复合成新的矿床,

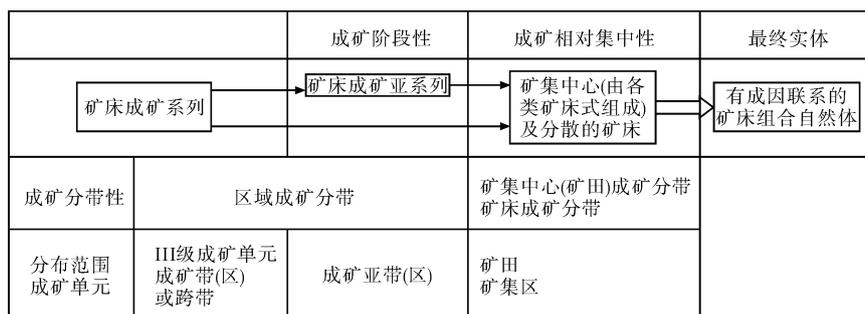


图2 矿床成矿系列内部结构及组成实体

Fig. 2 Internal structure and composition entity of minero-genetic series for mineral deposits

或者部分改造。在这种情况下,被复合改造的矿床归属哪一期矿床成矿系列?我们建议以改造程度来定,如改造强烈已基本成为新的矿床,则应纳入晚期成矿作用形成的矿床成矿系列中。例如在我国南方早期形成的矿床成矿系列中有富硫化物的铜钨矿床(江西东乡县枫林铜钨矿、铅山县永平铜钨矿及广东曲江县大宝山铜钨多金属矿),当矿体出露地表,受表生成矿作用的改造,形成含钨的铁帽矿床,这部分铁帽矿床应纳入晚期形成的表生成矿作用形成的矿床成矿系列,但在矿床论述时应加以说明(陈毓川和王登红,2012);如果改造程度不高,老矿床基本保持,则仍应纳入早期的矿床成矿系列,对矿床被改造的情况应予以论述。如内蒙古白云鄂博铁、稀土矿床至少有三期成矿:新元古代、早古生代、晚古生代,但其主体保持的是新元古代成矿的矿床,应纳入新元古代的矿床成矿系列,同时要说明后期被改造的情况。新太古代形成的受变质沉积铁矿床成矿系列,如鞍山式铁矿,其内有后期成矿作用形成的富矿体,但主体仍是以原来的贫矿为主的受变质沉积矿床,因此,仍保留原矿床成矿系列,把后期局部改造为富矿作必要论述即可。

4.2.2 同时期矿床成矿系列的叠加与复合

在一些地区,同一时间段内,岩浆成矿作用十分强烈,受不同构造控制,有多个成矿岩浆源活动,在不同的地质构造带内,可同时形成多个矿床成矿系列。如华南地区燕山期在不同构造带内,不同岩浆成矿源的成矿作用形成了不同的矿床成矿系列:以幔源为主的长江中下游矿床成矿系列,以壳源为主的南岭矿床成矿系列和壳幔混源的赣东北与燕山期中酸性岩浆岩有关的铜、铅、锌、金、银矿床成矿系列(陈毓川等,2014)。它们之间存在两种关系:①分别形成的矿床在空间分布上有交叉叠加,如南岭矿床成矿系列范围内有水口山—康家湾的铅、锌、金、银矿、赣县银坑金银铅、锌矿;在赣东北地区有葛源钨、锡、铋、钼矿、朱溪超大型钨、铜矿等;在长江中下游的铜、金、银矿亚系列范围内有姚家岭含钨的铅、锌矿产出等。因此,在同一时段及同一地质环境中可以同时或先后形成两种矿床成矿系列的矿床,在大区域内它们又可分别属于不同的矿床成矿系列;②两种矿床成矿系列的成矿作用复合在一个矿床中,如江西东乡、永平和广东大宝山铜、钨(钼、多金属)矿床,存在这种可能。那里均先铜后钨(钼)成矿,后期的钨(钼)矿化普遍复合在早期的铜硫化物矿体之内,亦可形成独立钨、钼矿体(如大宝山矿床)。对此现象的解释很可能是这两种矿床成矿系列的岩浆成矿源由于矿床所处的构造位置的特殊几乎同时先后在此

成矿,但也不排除两种岩浆成矿源在深部熔合,形成复合类型矿床(如江西朱溪钨、铜矿?)。因此,在华南地区燕山期不同地质构造带中,由岩浆成矿作用形成的各个矿床成矿系列的矿床,可相互叠加亦可相互复合。这说明这些矿床成矿系列之间存在着内在联系,均受深部壳幔作用及浅、深部的构造运动控制,属于一个成矿体系——华南中新生代陆内岩浆成矿体系。

5 矿床成矿系列研究的理论与实用意义

矿床成矿系列研究是成矿系列研究工作的核心部分,其研究的理论意义是从四维时空域研究矿床与各类矿床组合在矿床世界中的定位,并确定相对独立的矿床组合自然体——矿床成矿系列实体;研究探索在此实体内矿床形成过程与时空分布规律;进而研究探索区域内矿床成矿系列之间及各类矿床成矿系列间存在的联系,形成在一定域内的成矿体系;再进一步研究探索矿床成矿系列在地质年代中的演化规律。本项研究将会使区域成矿规律研究提升到一个新水平,将对探索地球的演化过程与规律提出重要依据和某些新的认识,为发展地球科学作出应有贡献,这正是本项研究的科学目标。

矿床成矿系列研究应用于找矿始终是研究的主体目标。成矿系列概念中核心思想是矿床不是孤立存在,而是以矿床组合自然体存在,并且矿床组合在时空分布上是有规律的。

用成矿系列概念研究不同找矿地区的矿床成矿系列,就是以本地区地质构造环境、已有矿床为基础,分析研究成矿作用,研究提出可能的矿床成矿系列、可能的矿床组合,结合地、物、化、遥找矿信息,提出找矿的方向及有利的成矿地质构造部位,为找矿服务。37年期间,从全国二轮区划(1992—1995年)(陈毓川,1999)到中国成矿体系和区域成矿评价(1999—2004年)(陈毓川等,2007)再到重要矿产资源潜力评价(2006—2013年)(陈毓川等,2015b),都应用了成矿系列概念作为区域成矿规律研究与成矿预测的重要理论基础,并取得较好的应用效果。一些重要成矿带,如长江中下游、南岭、阿尔泰、天山、秦岭、三江、华北地台北缘等成矿带及各省、自治区、直辖市都进行了矿床成矿系列的研究,并用于指导找矿,取得不同程度的找矿效果,并提出了成矿系列缺位找矿的思路和方法(常印佛等,1991;李人澎,1996;王登红等,2002,2011;唐菊兴等,2014)。不少地勘、科研、教学单位同仁们亦应用成矿系列概念进行区域成矿规律的研究与找矿工作取得不少成果(陈平和陈俊明,1996;章百明,1996;韩

振新等, 1996, 2004; 刘德权等, 1996; 罗铭玖等, 2000; 冯学仕和王尚彦, 2004; 李均权等, 2005; 于学峰等, 2016)。我们相信随着研究程度的提高, 应用成矿系列概念进行区域成矿规律研究, 充分利用多元信息与计算机平台结合开展成矿预测必将会更有效地指导找矿, 同时将进一步提高区域成矿理论水平。

成矿系列概念作为区域成矿规律研究的一个派系, 运行尚属起步, 但短短的近四十年的实践, 已充分证明其具有生命力, 是一个很值得研究探索的方向, 具有重大的理论与应用意义。我们衷心希望有更多同仁参与到这个领域的研究, 让我们共同努力, 为探索地球奥秘, 实现一流创新, 为人类更好服务而奋斗!

此文发表亦为纪念提出成矿系列概念的创始人程裕淇先生, 并作为中国地质科学院成立 60 周年的薄礼!

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. DD20160346).

参考文献:

- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈平, 陈俊明. 1996. 山西主要成矿区带成矿系列及成矿模式[M]. 太原: 山西科学技术出版社.
- 陈毓川. 1983. 华南与燕山期花岗岩有关的稀土、稀有、有色金属矿床成矿系列[J]. 矿床地质, 2: 15-24.
- 陈毓川. 1994. 矿床的成矿系列[J]. 地学前缘, 1(3-4): 90-94.
- 陈毓川. 1997. 矿床的成矿系列研究现状与趋势[J]. 地质与勘探, 33(1): 21-25.
- 陈毓川, 黄民智, 徐珏, 艾永德, 李祥明, 唐绍华, 孟令库. 1985. 大厂锡石—硫化物多金属矿带地质特征及成矿系列[J]. 地质学报, (3): 228-240.
- 陈毓川, 毛景文, 黄民智, 邹天人, 梁祥济, 王平安, 徐志刚. 1995. 桂北地区矿床成矿系列和成矿历史演化轨迹[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川, 裴荣富, 宋天锐, 邱小平. 1993. 中国矿床成矿系列. 第五届全国矿床会议论文集[C]. 北京: 地质出版社: 89-91.
- 陈毓川, 裴荣富, 宋天锐, 邱小平. 1998. 中国矿床成矿系列初论[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 王平安. 2015a. 论矿床的自然分类——四论矿床的成矿系列问题[J]. 矿床地质, 34(06): 1092-1106.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红. 2006. 三论矿床的成矿系列问题[J]. 地质学报, 10: 1501-1508.
- 陈毓川, 裴荣富, 张宏良, 林新多, 白鸽, 李崇佑, 胡永嘉, 刘娟群, 洗柏琪. 1989. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的

- 有色及稀有金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川, 王登红, 徐志刚. 2015b. 中国重要矿产和区域成矿规律[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川, 王登红, 徐志刚, 黄凡. 2014. 华南区域成矿和中生代岩浆成矿规律概要[J]. 大地构造与成矿学, 38(02): 219-229.
- 陈毓川, 王登红, 朱裕生, 徐志刚, 任纪舜, 翟裕生, 常印佛, 汤中立, 裴荣富, 滕吉文, 邓晋福. 2007. 中国成矿体系与区域成矿评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川, 王登红. 2012. 华南地区中生代岩浆成矿作用的四大问题[J]. 大地构造与成矿学, 36(03): 315-321.
- 陈毓川. 1999. 中国主要成矿区带矿产资源远景评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣, 宋天锐. 1979. 初论矿床的成矿系列问题[J]. 中国地质科学院院报, 1(1): 32-57.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣, 宋天锐. 1983. 再论矿床的成矿系列问题[J]. 中国地质科学院院报, 5(6): 1-64.
- 冯学仕, 王尚彦. 2004. 贵州省区域矿床成矿系列与成矿规律[M]. 北京: 地质出版社.
- 韩振新, 郝正平, 侯敏. 1996. 黑龙江主要成矿带矿床成矿系列[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社.
- 韩振新, 徐衍强, 郑庆道. 2004. 黑龙江省重要金属和非金属矿产的成矿系列及其演化[M]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社.
- 李均权, 谭秋明, 李江洲. 2005. 湖北省矿床成矿系列[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社.
- 李人澎. 1996. 成矿系统分析的理论与实践[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 1996. 中国新疆矿床成矿系列[M]. 北京: 地质出版社.
- 罗铭玖, 黎世美, 卢欣祥. 2000. 河南省主要矿产的成矿作用及矿床成矿系列[M]. 北京: 地质出版社.
- 《宁芜玢岩铁矿》编写组. 1978. 宁芜玢岩铁矿[M]. 北京: 地质出版社, 1-196.
- 裴荣富, 吕凤翔, 范继璋, 方如恒, 齐朝顺. 1998. 华北地块北缘及其北侧金属矿床成矿系列与勘查[M]. 北京: 地质出版社.
- 彭翼, 何玉良. 2015. 河南省区域成矿规律[J]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 唐菊兴, 王勤, 杨超, 丁帅, 郎兴海, 刘鸿飞, 黄勇, 郑文宝, 王立强, 冯军, 段吉琳, 宋杨, 王艺云, 林彬, 方向, 张志, 杨欢欢. 2014. 青藏高原两个斑岩—浅成低温热液矿床成矿亚系列及其“缺位找矿”之实践[J]. 矿床地质, 33(6): 1151-1170.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 陈郑辉, 沈保丰, 汤中立, 裴荣富. 2011. 成矿体系的研究进展及其在成矿预测中的应用[M]. 地球学报, 32(4): 385-395.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律研究[M]. 北京: 原子能出版社.
- 王登红, 邹天人, 徐志刚, 余金杰, 付小方. 2004. 伟晶岩矿床示踪造山过程的研究进展[J]. 地球科学进展, 19(4):

614-621.

- 王登红. 1995. 新疆阿舍勒火山岩型块状硫化物铜矿床成矿机制与成矿模式[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 王平安, 陈毓川, 裴荣富. 1998. 秦岭造山带区域矿床成矿系列、构造-成矿旋回与演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 于学峰, 张天祯, 王虹, 程光锁, 李大鹏, 倪振平, 宋明春, 张增奇, 李洪奎, 杨恩秀. 2016. 山东省矿床成矿系列研究[J]. 矿床地质, 35(01): 169-184.
- 翟裕生, 姚书振, 崔彬. 1996. 成矿系列研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 周珣若, 万天丰, 金福全, 周宗桂. 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M]. 北京: 地质出版社.
- 章百明, 赵国良, 马国玺. 1996. 河北省主要成矿区带矿床成矿系列及成矿模式[M]. 北京: 石油工业出版社.

References:

- CHANG Yin-fo, LIU Xiang-pei, WU Yan-chang. 1991. Fe-Cu metallogeny of the Middle-Lower Yangtze River Valley[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHEN Ping, CHEN Jun-ming. 1996. Minerogenetic series and model of major metallogenetic belts in Shanxi Province[M]. Taiyuan: Science and Technology Press of Shanxi(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan. 1983. Minerogenic series of Ree-Rare metal nonferrous metal deposits related to Yanshanian granites in South China[J]. Mineral Deposits, (2): 15-24 (in Chinese).
- CHEN Yu-chuan. 1994. Metallogenic series of ore deposits[J]. Earth Sciences Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 1(3-4): 90-94 (in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan. 1997. Present situation and trend of research on metallogenic series of ore deposits[J]. Geology and Exploration, 33(1): 21-25(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, HUANG Min-zhi, XU Jue, AI Yong-de, LI Xiang-ming, YONG Shao-hua, MENG Ling-ku. 1985. Geological features and metallogenetic series of the Dachang cassiterite-sulfide polymetallic belt[J]. Acta Geologica Sinica, 59(3): 228-240(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, MAO Jing-wen, HUANG Min-zhi, ZOU Tian-ren, LIANG Xiang-qi, WANG Ping-an, XU Zhi-gang. 1995. Metallogenic series of ore deposits and metallogenetic evolution through geological history in north Guangxi[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, SONG Tian-rui, QIU Xiao-ping. 1993. Minerogenetic series in China//Contribution to the 5th national meeting of mineral deposits in China[C]. Beijing: Geological Publishing House: 89- 91(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, SONG Tian-rui, QIU Xiao-ping. 1998. Preliminary study on minerogenetic series in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, WANG Ping-an. 2015a. Natural classification of mineral deposits: Discussion on minerogenetic series of mineral deposits (IV)[J]. Mineral Deposits, 34 (6): 1092-1106(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong. 2006. On minerogenetic (metallogenetic) series: Third discussion[J]. Acta Geologica Sinica, 80(10): 1501-1508(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, ZHANG Hong-liang, LIN Xin-duo, BAI Ge, LI Chong-you, HU Yong-jia, LIU Gou-qun, XIAN Bai-qi. 1989. The geology of nonferrous and rare metals related with the Mesozoic granitoid in the Nanling region[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, XUE Zhi-gang. 2015b. Important minerals and regional metallogenic regularity in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, XU Zhi-gang, HUANG Fan. 2014. Outline of regional metallogeny of ore deposits associated with the Mesozoic magmatism in South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 38(02): 219-229(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, ZHU Yu-sheng, XU Zhi-gang, REN Ji-shun, ZHAI Yu-sheng, CHANG Yin-fo, TANG Zhong-li, PEI Rong-fu, TENG Ji-wen, DENG Jin-fu. 2007. Chinese mineralization system and assessment of regional mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong. 2012. Four main topics concerning the metallogeny related to Mesozoic magmatism in South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 36(03): 315-321(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan. 1999. Mineral resources assessment of major metallogenic provinces in China[J]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- CHENG Yu-qi, CHEN Yu-chuan, ZHAO Yi-ming, SONG Tian-rui. 1983. Further discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 6: 1-64(in Chinese).
- CHENG Yu-qi, CHEN Yu-chuan, ZHAO Yi-ming, SONG Tian-rui. 1979. Preliminary discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1: 32-58(in Chinese).
- FENG Xue-shi, WANG Shang-yan. 2004. Minerogenetic series of regional resources in Guizhou[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- HAN Zhen-xin, HAO Zheng-ping, HOU Min. 1996. Minerogenetic sense of major metallogenetic belts in Helongjiang Province[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press(in

- Chinese).
- HAN Zhen-xin, XU Yan-qiang, ZHEN Qing-dao. 2004. Minerogenetic series of important metal and non-metal mineral resources in Heilongjiang[M]. Harbin: People Press of Heilong(in Chinese).
- LI Jun-quan, TAN Qiu-ming, LI Jiang-zhou. 2005. Minerogenetic series of Hubei[M]. Wuhan: Science and Technology Press of Hubei(in Chinese).
- LI Ren-peng. 1996. Theory and practice of the metallogenetic system[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LIU De-quan, TANG Yan-ling, ZHOU Ru-hong. 1996. Minerogenetic series of Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LUO Ming-jiu, LI Shi-mei, LU Xin-xiang. 2000. Mineralization and minerogenetic series of major mineral resources in Henan province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- PEI Rong-fu, LÜ Feng-xiang, FAN Ji-zhang, FANG Ru-heng, QI Chao-shun. 1998. Minerogenetic series and prospecting of ore deposits in the north margin and further area of the Huabei massif[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- PENG Yi, HE Yu-liang. 2015. Regional metallogenetic regularity in Henan province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- TANG Ju-xing, WANG Qin, YANG Chao, DING Shuai, LANG Xing-hai, LIU Hong-fei, HUANG Yong, ZHENG Wen-bao, WANG Li-qiang, FENG Jun, DUAN Ji-lin, SONG Yang, WANG Yi-yun, LIN Bin, FANG Xiang, ZHANG Zhi, YANG Huan-huan. 2014. Two porphyry epithermal deposit metallogenetic subseries in Tibetan Plateau: Practice of "absence prospecting" deposit metallogenetic series[J]. Mineral Deposits, 33(6): 1151-1170(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, XU Zhi-gang, CHEN Zheng-hui, SHEN Bao-feng, TANG Zhong-li, YEI Rong-fu. 2011. Advance in the study of mineralization system and its application to assessment of mineral resources[J]. Acta Geoscientifica Sinica, 32(4): 385-395(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, XU Zhi-gang. 2002. Minerogenetic series and regularity of mineralization in the Altay metallogenetic province, China[M]. Beijing: Atomic Press(in Chinese).
- WANG Deng-hong, ZOU Tian-ren, XU Zhi-gang, YU Jin-jie, FU Xiao-fang. 2004. Advance in the study of using pegmatite deposits as the tracer of orogenic process[J]. Advances in Earth Science, 19(4): 614-621(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong. 1995. On the metallogenetic mechanism and model of the Ashele volcanogenic massive sulfide copper deposit, Xinjiang[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- WANG Ping-an, CHEN Yu-chuan. 1998. Regional minerogenetic series, tectonic-mineralization cycle and evolution of the Qinling orogenic belt[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- YU Xue-feng, ZHANG Tian-zhen, WANG Hong, BAO Guang-suo, LI Da-peng, NI Zhen-ping, SONG Ming-chun, ZHANG Zeng-qi, LI Hong-kui, YANG En-xiu. 2016. A study of minerogenetic series of mineral deposits in Shandong Province[J]. Mineral Deposits, 35(01): 169-184(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Yu-sheng, YAO Shu-zhen, LIN Xin-duo, ZHOU Xun-ruo, WAN Tian-feng, JIN Fu-quan, ZHOU Zong-gui. 1992. Fe-Cu (Au) metallogeny of the Middle-Lower Yangtze River Valley[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHAI Yu-sheng, YAO Shu-zhen, CUI Bin. 1996. Research on metallogenetic series[M]. Beijing: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- ZHANG Bai-ming, ZHAO Guo-liang, MA Guo-xi. 1996. Minerogenetic series and model of major metallogenetic belts in Hebei Province[M]. Beijing: Petroleum Press(in Chinese).