

成矿系统时空演化及其找矿意义

翟裕生^{1,2}, 王建平^{1,2}, 邓 军^{1,2}, 彭润民^{1,2}, 刘家军^{1,2}

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国地质大学 岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 成矿系统是复杂地球巨系统的有机组成部分, 其形成分布受地球系统演化的控制。地球历史演化的不同时期发育不同成矿系统, 这些成矿系统既是地球系统演化的产物, 也在一定程度上记录了地球系统的演化进程。我国地处古亚洲、特提斯—喜马拉雅和环太平洋成矿域的结合部位, 构造演化历史十分复杂, 成矿系统的叠加复合作用明显, 是我国区域成矿的一个特色。成矿系统的空间分布受控于地球动力学的不均一性, 以古陆边缘为例, 离散型、会聚型、转换型3类构造动力环境各有其特定的成矿系统。成矿系统的形成深度、演变及现存深度取决于所在构造环境的演变。采用构造层含矿性分析法可预估一个区域中的可能矿床类型及其潜力。论文提出了隐伏矿带的概念, 将找寻隐伏矿床扩展为找寻隐伏矿带, 拓宽了深部找矿思路, 是区域成矿学及找矿学的一个进展。

关键词: 成矿系统; 时空演化; 叠加复合; 隐伏成矿带; 找矿预测

中图分类号: P61

文献标识码: A

文章编号: 1000-8527(2008)02-0143-08

Temporal-Spatial Evolution of Metallogenic Systems and Its Significance to Mineral Exploration

ZHAI Yu-sheng^{1,2}, WANG Jian-ping^{1,2}, DENG Jun^{1,2}, PENG Run-min^{1,2}, LIU Jia-jun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Lithospheric Tectonics and Lithoprobeing Technology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Metallogenic systems are an important component of the mega-earth system. Their formation and distribution are controlled by the evolution of the earth system. Different metallogenic systems formed at different stages of the geological history are the products of earth system evolution. These systems also document the evolutionary processes of the earth to a certain extent. As located in the junction of three tectonic metallogenic domains such as the Palaeo-Asia, the Tethys-Himalaya and the circum-Pacific plates, the China continent underwent very complex tectonic evolutionary processes. So the superimposition between metallogenic systems is obvious in China. This constitutes one of main regional metallogenic features of China. Spatial distribution of metallogenic systems is controlled by the unevenness of dynamics of the earth system. For example, different metallogenic systems occurred in divergent, convergent, and transformational tectonic regimes in palaeocontinental margins. Ore-forming depth, evolution and preservation depth of a metallogenic system depend on the evolution of tectonic setting. Analysis of ore-bearing probability of structural layers is an effective way to estimate probable ore deposit types and mineral resource potential in a region. The concept of concealed ore belt, which is put forward in this paper, will enlarge prospecting target from concealed ore deposit to concealed ore belt. Therefore it constitutes an important progress of regional metallogeny and mineral exploration.

收稿日期: 2008-04-01; 改回日期: 2008-04-20; 责任编辑: 楼亚儿。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40234051, 40602010); 国家重点基础研究发展规划项目(2006CB403503); 中国地质调查局“全国矿产资源潜力评价”项目。

作者简介: 翟裕生, 男, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 1930年出生, 矿床学专业, 主要从事矿床学、矿田构造和区域成矿学的教学和研究工作。Email: yszhai@cugb.edu.cn。

Key words: metallogenic system, temporal-spatial evolution, superimposition, concealed ore belt, ore prognosis

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^[1]。成矿系统是复杂地球系统的一个子系统,是地球系统漫长地质历史的产物。了解掌握成矿系统时间演化和空间分布特征,对于深入认识成矿规律和指导找矿勘查工作具有重要意义。

成矿系统研究体现了矿床形成有关的物质、运动、时间、空间、形成、演变整体观与历史观,体现了现代矿床学向系统化、全球化发展的一种趋势。其基本研究内容包括:①通过区域地质历史演化研究,了解成矿系统发生的地球动力学背景;②分析成矿控制因素的多因耦合、临界转换对成矿作用的控制,阐明成矿系统发生的主要机制;③通过成矿系统产物——矿化-异常网络的研究,查明成矿系统结构特征;④研究成矿系统形成后的变化保存情况,反演成矿系统形成—变化—保存的历史过程;⑤综合分析成矿系统的资源—环境效应。成矿系统时间演化和空间分布特征是成矿系统研究的重要内容之一。

1 成矿系统时间演化特征

成矿系统的时间演化研究主要包括两方面的内容:一是特定成矿系统在地球演化历史进程中的时间分布特征,即不同地球历史演化阶段中成矿系统的形成和持续情况;二是在地球历史演化中不同成矿系统之间的相互关系。

1.1 地史上主要成矿期及成矿系统

成矿系统是地球历史演化的产物,随着地球各层圈包括岩石圈、水圈、气圈、生物圈的形成和发展,地史上成矿系统的发生呈前进的、不可逆的发展过程,主要表现在4个方面:①成矿物质由少到多,如显生宙以来,有机质参与成矿越来越多;②成矿系统类型由简到繁;③成矿频率由低到高;④聚矿能力由弱到强^[2]。结合C. Meyer^[3]、J. Veizer^[4]、M. E. Barley^[5]等人的研究成果,依据成矿演化与地壳演化、大地构造演化的紧密联系,作者将地史上的成矿过程划分为7个阶段:①太古宙成矿期(>2 500 Ma);②古元古代成矿期(2 500 ~ 1 800 Ma);③中元古代成矿

期(1 800 ~ 1 000 Ma);④新元古代成矿期(1 000 ~ 600 Ma);⑤早古生代成矿期(600 ~ 400 Ma);⑥晚古生代及早中生代成矿期(400 ~ 200 Ma);⑦晚中生代—新生代成矿期(200 Ma—)(表1)。不同成矿期由于其构造背景不同,形成不同的成矿系统类型和不同矿产类型。太古宙与元古宙间的转变主要与地壳组成和结构的显著变化有关,而以后的几个转变主要与水圈、大气圈中化学组成(如O₂和CO₂量的变化)以及生物圈的进化有关。其中,⑥与⑦两个成矿期的突变则与联合古陆解体后现代板块构造体制的全面展开有关。

1.2 成矿系统之间的时间关系

从时间演化的角度来考察成矿系统之间的关系大致可有3种情况:新生成矿系统;成矿系统之间的继承转化;成矿系统之间的叠加复合。

成矿系统的新生是指在不同地球历史演化阶段中特定成矿系统的形成。如太古宙和古元古宙时地壳较薄,岩浆成矿系统、BIF型系统大量发育;中—新元古代时期大陆岩石圈初成,以形成SEDEX、VMS型成矿系统为特征。显生宙以来,板块构造体制全面展开,壳幔层圈发育趋于成熟和生物有机质大量繁衍并参与成矿,导致热液成矿系统数量剧增,生物成矿作用显著,因而产生众多的成矿系统,尤其是多种稀有元素、分散元素等经过多期地质作用反复浓集而形成多种成矿系统。每个成矿系统,都是在一定的地质环境中形成的,在一定程度上反映其积淀背景和时代特征。

成矿系统的继承与转化指在一定条件下,一种早期的成矿系统可为另一种较晚生成的成矿系统提供物质来源。如金、钨、锡、金刚石等的原生矿床经风化剥蚀搬运可转变为沉积砂矿系统。原生超镁铁质岩型镍矿可转变为风化壳型镍、铝、铁矿床系统。这些古老成矿系统经过新生代风化作用转化为外生成矿系统的过程比较清晰。有些成矿系统间的转化比较复杂。例如,古老砂页岩铜矿,当其所在的稳定地块经后期构造—岩浆强烈活化时,可经过重熔作用(花岗岩化等)而转变为斑岩铜矿系统^[6]。

成矿系统的叠加复合指在一定的成矿区带中,晚期的成矿系统在空间上重叠在早期成矿系统之上,或对早期成矿系统加以继承和改造。叠加复合

表 1 全球主要成矿期及相关成矿系统 (据文献 [2], 有补充)
Table 1 Main global metallogenic epochs and related metallogenic systems

序号	主要成矿期/Ma	大地构造背景和重要地质事件	主要矿种	主要成矿系统
1	太古宙成矿期 (>2 500)	地球降温, 陆核形成; 原始地壳薄, 成分偏基性, 地表热流值高; 镁质火山活动强烈, 绿岩带发育	Fe、Cr、Ni、Cu、Zn、Au	绿岩型金矿, 阿尔果马型铁矿, 火山岩型 Cu、Zn 矿, 科马提岩型 Ni(Cu) 矿, 含 Au-U 砾岩型矿
2	古元古代成矿期 (2 500 ~1 800)	富钾花岗岩发育, 硅铝质陆壳增生加厚, 花岗岩及玄武质层圈形成; 原始地台形成; 大陆架宽广, 杂砂岩、砾岩层发育	Au、U、Fe、Cu、Zn、Cr、Ni	含 Au-U 砾岩型, 苏必利尔型 Fe 矿, 层状火成杂岩型 Cr-Pt-V-Ti 矿, VMS 型 Cu-Zn-Pb 矿
3	中元古代成矿期 (1 800 ~1 000)	稳定地台形成, 出现宽阔盆地及狭长地槽; 长期古陆风化剥蚀; 大气和水圈中 O ₂ 剧增, 氧化—还原状态急剧变化, 红层出现; 1 600 ~1 400 Ma 地球膨胀明显	REE、Pb、Fe、Mn、Cu、U、V、Ti	SEDEX 型 Pb-Zn (Cu) 矿, 红层铜矿, 赤铁矿矿床, 岩浆熔型 Cu-Ni 矿, 奥林匹克坝 Cu-U-Au 矿, 白云鄂博 REE-Fe 矿, 斜长岩型 V-Ti-Fe 矿
4	新元古代成矿期 (1 000 ~600)	超大陆形成 (Pangea 850 Ma); 生命活动显著增长, 沉积物中有机碳增加; 全球性造山及褶皱带, 其后发育震旦纪盖层	Mn、P、U、Pb、Zn、W、Sn、Fe	海相沉积 Mn、P、Fe 矿, 砂页岩型铜矿, 碳酸盐型 Pb、Zn 矿, 火山岩型 Cu 矿, 与花岗岩有关的 W、Sn 矿
5	早古生代成矿期 (600 ~400)	显生宙开始, 板块构造活动明显; 高等生物大量发育 (生物大爆发); 黑色岩系、硅质岩、含磷岩系发育; 台地型礁灰岩广布	Mn、P、Zn、Cu、Mo、V、Pb-In、石油、盐类	黑色页岩型 Cu-V-U 矿, 火山岩型 Cu-Pb-Zn 矿, 生物成因磷矿, 海相沉积 Fe、Mn、P 矿, 碳酸盐岩中 Pb-Zn 矿
6	晚古生代及三叠纪成矿期(400 ~200)	大陆扩张, 生命活动大量由海登陆, 陆上高等生物剧增; 陆相及海相交互沉积岩发育; 地球膨胀明显(290 ~230 Ma); 裂谷发育	Pb-Zn、Cu、U、V、Al、Fe、Sn、Ag、石油、煤、盐类	SEDEX 型 Pb-Zn-Ag 矿, 陆缘浅海 Fe、Al 矿, 煤田、油气田、盐类矿床
7	晚中生代—新生代成矿期(200—)	陆内造山带, 盆山系统, 线性构造带; 地中海—环太平洋挤压—俯冲带; 大洋底中脊及转换断层; 花岗岩类有陆内碰撞型和陆缘俯冲型; 大陆风化壳, 稳定海岸带	W、Sn、Mo、Cu、Pb、Zn、REE、Nb、Ta、Hg、Sb、As、Ge、Te、Al、Ni、Cr、Mn、Ti、Zr、盐类、石油、煤等	斑岩 Cu(Mo、Au) 矿, 浅成低温热液 Au 矿, 黑矿型, 花岗岩型 W-Sn、Mo 矿, 砂岩型 Pb-Zn 矿, 塞浦路斯型 Cr 矿, 蒸发盐湖, 现代洋底热水型硫化物矿床, 红土型 Ni 矿, 滨海砂矿

成矿常造成复杂的矿床物质组成和结构, 也是形成大矿、富矿的重要因素。成矿系统叠加一般发生在构造多旋回地区, 常出现在古陆边缘构造带或陆内活化带。中国地处三大板块的结合部, 壳—幔作用频繁, 多旋回的构造、沉积、岩浆活动发育, 具备发生多个成矿系统叠加的有利条件。

1.3 叠加复合成矿系统

早在 1975 年, 涂光炽先生提出要注意研究叠加成矿作用和再改造成矿作用, 并对沉积—改造、活泼元素改造矿床等作了深入研究^[7], 引起人们的重视。在成矿系统研究中, 作者将叠加与改造成矿作用扩展到成矿系统间的叠加与改造^[8]。通过多年的研究, 在我国已发现多处成矿系统叠加的实例, 如大厂、白牛厂、大宝山、铜陵、白云鄂博矿床等(表 2)。成矿系统的叠加复合已构成了中国区域成矿的一个特色^[9-10]。据新近报导, 在俄罗斯远东地区的金银多金属矿床中也发育叠加成矿作用, 不同时代不同成因类型矿化的叠加

是形成大型金矿的重要条件^[11]。

1.3.1 叠加复合成矿效应

叠加复合成矿系统中由于成矿作用的复杂而导致成矿物质的复杂多样, 既有早期成矿物质, 也可在后期叠加成矿中带入新的成矿物质。这是我国金属矿产资源中综合矿多、单一矿少的一个重要原因。我国很多矿床都是多元素共生或伴生, 这一方面提高了矿床的工业价值, 另一方面也增加了矿石选冶难度。如世界著名的白云鄂博矿床, 其中含有矿物 170 余种, 而且一些矿物如黄河矿、包头矿、丁道衡矿、张培善矿等几十种矿物不仅是世界上首次发现, 也是白云鄂博所独有。在特定的成矿环境中, 因叠加复合成矿作用的方式和强度不同, 可使系列中成矿物质表现出继承性和新生性(表 3)。

叠加复合成矿不仅表现为金属矿床的形成, 我国能源矿产也表现出叠加复合成矿特征。如我国的煤炭资源, 中高级变质煤所占比例远高于其他产煤大国, 一个主要原因就是中—新生代以来频繁

表2 中国若干叠加复合成矿系统
Table 2 Major superimposed metallogenic systems of China

区域背景	不同成矿系统间的复合关系	矿床实例
长江中下游断拗带	海西期热水沉积成矿 + 燕山期岩浆—热液成矿	武山、铜官山铜矿
长江中下游断拗带	三叠纪蒸发岩成矿 + 燕山期岩浆—热液成矿	程潮铁矿
浙赣断拗带	晚石炭世(C ₂ h)热水沉积成矿 + 燕山期岩浆—热液成矿	建德岭后铜矿
粤北晚古生代盆地	中泥盆世东岗岭热水沉积—火山沉积成矿 + 燕山期岩浆—热液成矿	大宝山铁—钨多金属矿
桂西北丹池断陷带	中泥盆世东岗岭热水沉积—火山沉积成矿 + 燕山期岩浆—热液成矿	大厂锡—多金属矿
扬子西南缘早古生代裂陷槽	中寒武世 SEDEX 成矿 + 燕山期岩浆—热液成矿	白牛厂银矿
华北地台北缘古裂谷区	中元古代裂谷热水沉积 + 古生代碳酸岩浆—稀土成矿	白云鄂博铁—稀土矿
扬子地台边缘断陷盆地潮坪区	早震旦世沉积锰矿 + 印支期岩浆—热液成矿	宁乡棠甘山锰矿
华南陆表海沉积区	晚石炭世沉积锰矿 + 燕山期岩浆—热液成矿	连城庙前锰矿
闽西南断陷带	中泥盆世晚期沉积锰矿 + 燕山期岩浆—热液成矿	玛瑙山锰矿
羌塘—昌都微陆块东缘	中生代(晚三叠世甲丕拉组)砂岩铜矿 + 喜山期岩浆—热液成矿	玉龙铜矿*
湘南海西—燕山期成矿带	晚二叠世煤系 + 燕山期花岗岩接触热变质石墨矿	郴州鲁塘石墨矿

注: *据唐菊兴等, 1996; 对大厂和白云鄂博等矿床的成矿过程有不同认识。

表3 叠加复合成矿系统中矿质的继承性与新生性
Table 3 Successiveness and neogenesis of ore-forming materials in superimposed metallogenic systems

类型	早期成矿组分	晚期成矿组分	矿床实例
I. 早、晚矿质基本不一致	SnO ₂ , Fe, Zn 的硫化物	Sb, Pb, Zn, W, As	大厂锡多金属矿
	石膏	Fe	程潮铁矿
II. 早期矿质上新矿质的继承与叠加	Fe(REE?)	REE	白云鄂博铁—稀土矿
	Fe-Mn	Pb, Zn	玛瑙山锰矿
	MnCO ₃	MnS ₂	棠甘山锰矿
	黄铁矿	黄铜矿(方铅矿、闪锌矿)	建德岭后铜矿
III. 早期矿质的晚期相变	黄铁矿、菱铁矿、黄铜矿	辉钼矿、黄铜矿、白钨矿	大宝山铁—钨多金属矿
	煤层	石墨	郴州鲁塘石墨矿

的构造岩浆活动对前中生代聚煤盆地强烈的改造作用所致。又如我国的含油气盆地以经历过多次构造与沉积叠加为特征, 一般用“叠合盆地”去统称那些由两种或两种以上类型的原型盆地叠加或复合在一起的盆地。这些盆地的特性可概括为“多期成盆、多期改造、多套烃源岩、多次生排烃、多期运聚散”^[12]。叠合盆地的发育, 使得我国油气成藏作用也明显复杂化, 如在冀东、彩南、二连等盆地中形成独具特色的“混源油”。关于叠合盆地的成藏已由国家“973”项目《中国典型叠合盆地油气形成富集与分布预测》(G19990433)进行过专门研究。

1.3.2 沉积—岩浆复合成矿系统的组合形式

沉积—岩浆叠加复合成矿是最常见的一种叠加复合成矿作用, 可有多种组合形式(图1)。从中国东部研究程度较高的成矿区带看, 古生代沉积(热水、火山)成矿系统与中生代(印支、燕山期)岩浆—热液成矿系统的叠加复合情况是多见的。其他的组合形式有待关注和进一步的研究。

沉积—火山沉积	岩浆—热液				
	1. 太古代	2. 元古代	3. 古生代	4. 中生代	5. 新生代
A. 太古代	?	○	○	⊙	○
B. 元古代		?	●	●	○
C. 古生代			?	●●●●	○
D. 中生代				●	
E. 新生代					?

●●●多见; ●确实; ⊙迹象; ○可能; ?不清

图1 早期沉积—晚期岩浆复合成矿系统的组合形式
Fig. 1 Combination model between early sedimentary and late magmatic hydrothermal metallogenic systems

实例: A4. 绿岩型金矿; B3. 白云鄂博铁—稀土矿; B4. 棠甘山锰矿; C4. 武山、铜官山铜矿、大宝山铁—钨多金属矿、大厂锡—多金属矿、岭后铜矿; D4. 狮子山铜矿; D5. 玉龙铜矿; 可能的实例: A2. BIF 的古老风化壳; A5、B5、C5. 早期矿床的表生风化壳

1.3.3 叠加复合成矿系统的形成条件

成矿系统间的叠加复合是形成“多矿源、多阶段、多成因”矿床或称多成因矿床的一种重要机

制,它形成了大量的层控矿床。在多种成矿因素的耦合条件下,成矿系统叠加也是形成大型、超大型矿床的重要原因。要深入研究的问题是,造成成矿系统复合的原因是什么?哪些因素控制了成矿系统的叠加复合?

通过对长江中下游、粤北盆地以及南岭等成矿区带的研究,初步认识到以下原因和条件。

(1) 稳定存在的地球化学场。在一些长期稳定存在的地球化学场中,可以多次供应所富含的某些成矿元素,发生多次浓集成矿,从而提供了在同一成矿场中两次(多次)成矿系统相互重叠的物质基础。例如南岭钨、锡地球化学省被认为是钨、锡多期成矿(燕山期成大矿)的物质来源。

(2) 成矿构造带(区)的重叠。每一成矿系统都有一定的构造位置,称为成矿构造带。若早期成矿构造带又被晚期成矿构造重叠时则可造成两个成矿系统的复合。例如,早期为伸展构造体制如裂谷、裂隙盆地中的沉积(热水沉积)成矿系统,而当其有相当厚的充填堆积物并受深部作用制约上隆回返造山时,可有深源岩浆热液成矿系统的叠加。又例如,中国东部的北东向构造带与近东西向构造带重叠时也会产生叠加成矿系统,如闽赣粤边界成矿区。

(3) 构造—热点的长期存在,为多个成矿系统的形成提供了必要的热动力源。如古陆缘构造带一般具有长期活动历史,陆—陆之间多次开合,造盆与造山运动的多次更替,巨型断裂带的多次活动等,形成异常高的地热流,有较强的岩浆热,同时构造运动释放出大量能量。多种热源有利于维持一定规模的古地热异常场,成为驱动成矿物质运动、分异并汇聚成矿的区域热动力背景。

(4) 同生断层的多期反复活动。通过对铜陵、大宝山等地同生矿床的实际研究及与国内外有关多因复成矿床的对比,发现同生断层既是海相沉积喷流矿床(SEDEX 型等)的含矿流体通道和部分矿石堆积场地;当它在后期构造动力影响下又重新开裂活动时,又可能作为后期岩浆热液的通路和岩浆及相关矿床的就位场所^[13]。因此,一部分同生断层是沟通早、晚两期成矿叠加的纽带和媒介,对于沉积改造型矿床的产出起到至关重要的作用。

(5) 早期成矿系统中某些层状矿床的矿石矿物组合可作为晚期含矿流体的地球化学障,从而有利于二者在空间上的重叠。例如,一些地层中的黄铁矿层中的硫离子,有较强的还原能力,当后来岩浆热液等含矿流体与其接触反应时,有利

于铜元素等的沉淀富集,形成黄铜矿、斑铜矿等矿石矿物组合。长江中下游成矿带的层控铜—多金属矿床可能就是这种成矿机制。

(6) 保存条件良好。这有两层含义:早期成矿系统发生后,有较好的保存条件,并产在适当的深度;当后来成矿系统叠加其上共同形成复合成矿系统后,又有良好的保存条件,因而能一直保存至今而能被人们发现、开发利用和研究。

需要说明的是,上述几点原因并不完全适用于所有的成矿系统叠加过程,而比较适用于早期沉积(火山沉积、热水沉积、沉积变质)成矿系统与晚期岩浆热液成矿系统的叠加复合。再有,在自然界中以上几个因素完全具备的情况是少有的,因此,叠加成矿系统并不多见。从这个意义上说,从我国大地构造动力演化入手,加强对叠加复合成矿系统的研究,对深入认识中国区域成矿特征、丰富成矿学研究内容具有很重要的意义。

2 成矿系统的空间分布格局

前已述及,研究成矿系统的时间演化有助于认识成矿系统形成的长期性、复杂性和交替演变规律。而研究成矿系统的空间格局,则是在厘定其时间范围的前提下,将其时间演化与空间分布融合一起,具体表现为不同地质环境和不同构造动力背景下形成的成矿系统与成矿区带,以最终阐明矿床的空间分布规律。

2.1 地质构造动力环境与成矿系统

成矿系统是地球动力演化的产物,构造动力是成矿的基本因素之一,不同的构造动力体制产生不同的成矿系统,常见的构造动力体制有 6 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,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^[1]。

以上 6 种构造体制都有相应的构造组合、岩石建造、流体系统、矿质来源和产生的成矿系统。这些构造动力—成矿系统在地球岩石圈中广泛分布,尤以在古大陆边缘表现更为突出。

古陆边缘是壳幔作用活跃、构造运动复杂、

各层圈的物质及能量交换频繁、成矿作用显著的大地构造单元。全球范围内有许多巨型矿床分布在古大陆边缘和现今大陆的边缘。按照古陆边缘的构造动力学特征,可划分为离散型、会聚型和转换型3种基本的大陆边缘系统^[14],它们各有其构造成矿系统,其要点见表4^[15]。表中所列的3种陆缘构造型式互相关联,彼此可递变,也可复合。一个古陆的不同边缘部位可有不同的动力状态,例如,当印度板块向欧亚板块推挤俯冲时,其主碰撞带(喜马拉雅带)为挤压状态,而其东北一侧的云南三江地区属走滑构造体制,产有斑岩成矿系统和哀牢山构造带的第三纪金成矿系统等。

2.2 成矿系统的形成深度、演化与现今产出深度

成矿系统的形成深度是指成矿系统在其形成时所处的地壳一定深度,不同成因、不同类型的成矿系统其形成深度有很大的区别^[16](图2)。根据已有大量的探矿、采矿资料,已知变质、受变质矿床多发生在中下地壳,与幔源性一超基性岩浆有关的成矿系统产出也较深,可在中下地壳中发生。与花岗岩类有关的成矿系统多在上地壳、距地表5~15 km的范围内,而与陆上的海底的火

山一次火山活动有关的浅表热液矿床也可延深到地下3 km及以下。海陆盆地中的沉积矿床一般是近水平、延伸大的矿层,当其受到区域构造变动时可下降到地壳深处并受到明显的热动力变质改造。矿床的形成深度和产出深度是不同的概念,要注意从地质历史演进的观点加以区分,并注意二者的关联。关于矿床形成的深度已有专门的测定方法并积累了较多的实际资料,可以定量/半定量地测算和推断。而矿床现在的产出深度则是矿床形成后,又经过构造变动直至今今天所处的空间位置,情况比较复杂。矿床形成后可向上运动、向下运动或稳定在原来所在空间。深部形成矿床向上运动,最终将被剥露到地表,直到剥蚀殆尽,矿床消失。向下运动或保持在原地,如不经受后来剧烈的构造、岩浆热液活动,则可能被保存下来。地表形成矿床,再向下运动,则可被保存在一定的深度。据统计,同一地质环境中,浅部形成矿床和深部形成矿床,其被破坏和消失的速度不同,前者速度快,后者较慢,即后者被保留的概率较大。如斑岩铜矿,形成深度较浅,据研究^[17]其平均形成深度为1.9 km,剥蚀速率为158 m/Ma。估计地球历史上可能形成过

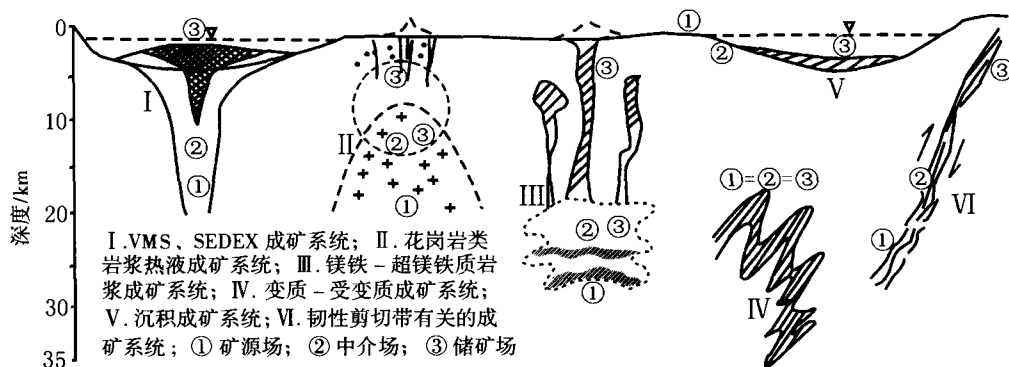


图2 主要成矿系统发育深度概图

Fig. 2 Depths of the occurrence of the major metallogenic systems

表4 古大陆边缘构造—成矿系统

Table 4 Tectono-metallogenic systems of palaeo-continental margins

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	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(含拉分盆地及火山一次火山带)	动力改造成矿型、斑岩热液型、火山热液型、热液改造成矿型	Au、Cu、Mo、Cr	郯庐断裂系 Mz 成矿带、滇西三江地区 Kz 成矿带

10万个斑岩铜矿,约2/3已被剥蚀(余下的33000个矿床,其中1.6%为已知,而大多数则被埋藏在不同深度,有待去发现)。被剥蚀的主要是形成年代久远的,而新生代发生的斑岩铜矿则相当大部分被保存下来,如安底斯带和冈底斯带的巨型斑岩铜矿带。与之可以对比的是,世界上许多元古代时期克拉通中生成的岩浆型Cu-Ni-Pt矿床、V-Ti-Fe矿等,因其形成深度较大被保存下来的概率较高。针对我国的地质构造演化历史,作者建议用构造层含矿性的分析方法,研究和推断深部矿床的位置。就我国中东部地区来说,一般可分为前寒武纪变质基底、古生代沉积盖层、中—新生代火山—沉积盆地3个构造层,每个构造层各有自己的成矿系统及其时空结构特征,如图3所示。

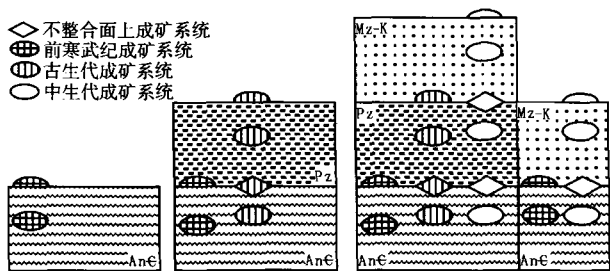


图3 不同构造层内成矿系统示意图

Fig. 3 Metallogenic systems in different structural layers

当研究一个地区的矿床分布时,依据精细的地质、地球物理探测,构筑二维、三维图像,研究矿床的垂直分带趋势,可运用上述构造层含矿性分析法,研究自上而下,自新到老,自浅到深可能存在的构造层(岩相、厚度等)及其中所含有的矿床类型及成矿系统。例如,长江中下游地区的前寒武系Fe、P矿, Pz_1 的沉积锰矿及热液矿, Pz_2 中SEDEX型、蒸发岩型矿床及大量的岩浆热液型、矽卡岩型矿床和斑岩型矿床,再有就是 $J_3 - K_1$ 火山岩盆地中的玢岩铁矿及热液型Cu、Au、Ag矿等。根据多方面的综合研究,认为长江中下游成矿带的深部还有广阔的找矿空间,如新近发现的泥河铁矿等。

2.3 从深部(隐伏)矿床到深部(隐伏)矿带

当前,在我国深部找矿工作已逐步展开。一方面在已知矿山深部和外围找寻隐伏矿床矿体;另一方面在新区的勘查评价中,尤其是对大型矿床,也还要注意埋藏较深的矿床矿体。这是一项缺乏经验、难度很大的工作,需要从成矿理论和探测方法等多方面开拓创新。从成矿系统研究的

角度看,需要探索的问题是:①成矿系统中发育的矿床类型及其空间结构;②成矿系统中矿床的产出深度及产出状态,如连续的、断续的,密集的、松散的……;③成矿系统矿化网络的被破坏程度,如是否受大断层分割错断?是否受褶皱而显著变形?④成矿系统的综合异常(地质的、化探的、物探的……),主要是异常的垂直分带特征,包括其在浅表的显示等。掌握上述信息对找寻深部矿床是很有帮助的。

目前,我国实施的危机矿山深部找矿工作成效显著,约2/3以上的有关项目已经发现新矿体或已知矿体的向深部延伸。隐伏矿床的预测找矿已引起广泛重视。众多隐伏矿床的发现也为矿床研究提供了丰富的新信息,给我们以多方面的启发。

近两年华北陆块区深部铁矿勘查成果显著。据《国土资源报》2007年11月23日报道:辽宁桥头深部发现厚大的铁矿体,初步预测矿区资源远景可达10亿t;山西呼延庆山铁矿普查,在钻孔中发现深处五台群金刚库组中的磁铁石英岩,共9层厚达42m的低品位铁矿,赵北—温子堡铁矿2个钻孔分别见矿53m、100.8m;河南练村隐伏铁矿在地下分别发现厚达104.14m和30m的矿体,品位为20%~35%;山东济宁在地下1600m发现厚达107.8m、品位为25%~35%的磁铁矿体。这些勘查发现多是在覆盖区,如山西呼延庆山铁矿的磁铁石英岩系赋存于中元古界白云质灰岩之下;河南练村太华群磁铁石英岩系之上有厚达800m的中生界覆盖层;山东济宁颜店地区铁矿产于济宁群浅变质岩系,也为大面积第四纪、新近纪松散沉积物所覆盖。华北地区大面积的航磁异常信息加上上述的新发现都预示着有深部隐伏—半隐伏沉积变质铁矿带的可能性。

闽中中生代火山岩盖层大面积分布,在其构造天窗的中元古代地层中SEDEX型Pb-Zn矿床的发现,说明火山岩盖层下存在隐伏—半隐伏的SEDEX型矿带。

另外,福建的一部分古生代煤系地层被上覆 $J_3 - K_1$ 火山岩层覆盖,或因大型推覆构造有加里东期花岗岩体覆盖其上,这些被掩盖的煤系也属于隐伏—半隐伏矿带。

基于上述事例,作者提出隐伏—半隐伏矿带(简称隐伏矿带)的概念,即产在地下一定深度(一般500m和更深)的矿带,它包括若干个矿田

(床),它是隐伏的区域尺度的矿化单元。一些层状或层控的矿床类型,如沉积变质铁矿及SEDEX型、沉积矿床等易于构成分布延伸广阔的隐伏一半隐伏矿带。其中隐伏矿带是指矿床全部隐伏,未在浅表出露;半隐伏矿带指在区域中有一部分矿床出露,而另一部分或大部分都处在隐伏状态。显然,找寻半隐伏矿带的难度与隐伏矿带相比相对较小。

找寻隐伏一半隐伏矿带要从研究区域成矿规律入手,从整体上和历史上研究区内有几个构造层,有几个时代的成矿系统及矿床组合,它们的产出空间何在?哪些已剥露,哪些尚在隐伏?采用的方法技术应是综合的,在有条件的地区可进行区域立体填图(深度1 000~2 000 m),在图中标出隐伏矿带及矿床的可能位置,经多方论证后,可进行钻探验证。

3 讨论与结论

区域成矿系统分析是研究区域成矿学的有效方法,而成矿系统的时空结构与演化是核心问题,本文在综合分析的基础上,着重阐明两个问题。

(1) 叠加复合成矿系统是中国区域成矿的一个显著特色,是中国复合—活动大陆成矿复杂性的表现。随着矿产勘查的深入进行,尤其是深部找矿的发展,预计将会发现更多的叠加成矿类型,其中一部分将是巨型矿床的成因。

(2) 隐伏(一半隐伏)矿带的提出标志着深部找矿对象和深部找矿空间的扩展,即:由找隐伏矿床→找隐伏矿带,由点上的深部找矿→面上的深部找矿。这种视野的开拓和思路的扩展,会使深部找矿工作进入一个新的更高阶段。目前这只是开始,但其意义重大。它有助于对一个区域中深部资源的全面整体评价和预测;它将推动对区域矿化块体(含矿块体),包括地球化学块体的综合研究与探测;它还将促进对区域成矿学和区域成矿系统的深入研究(三维、四维),而其最终结果是促成地下深处宝藏的重大发现。将这些深部找矿发现与西部新区找矿的重大发现汇集在一起,将有可能逐步结束“中国缺少大矿、富矿”的认识与判断。

参考文献:

- [1] 翟裕生. 论成矿系统 [J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 13-27.
- [2] 翟裕生. 地史中成矿演化的趋势和阶段性 [J]. 地学前缘, 1997, 4(3-4): 197-203.
- [3] Meyer C. Ore-forming processes in geologic history [J]. Economic Geology, 1981, 75: 6-41.
- [4] Veizer J. 地质历史中沉积亲缘矿石的演化以及对地壳、水圈、大气圈及生物圈演化总趋势的关系 [M] // 乌尔夫 K H. 层控矿床和层状矿床. 中译本第3卷. 北京: 地质出版社, 1979: 1-33.
- [5] Barley M E, Groves D I. Supercontinent cycles and the distribution of metal deposits through time [J]. Geology, 1992, 20: 291-294.
- [6] 陈文明. 斑岩铜矿与杂色砂页岩型层状铜矿内在联系的初步探讨 [J]. 地质论评, 1980, 28(6): 526-528.
- [7] 涂光炽. 叠加与再造——被忽视了的成矿作用 [J]. 湖南地质科技情报, 1975: 68-75.
- [8] 翟裕生, 邓军, 李晓波. 区域成矿学 [M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1-171.
- [9] Zhai Y S, Deng J, Peng R M. Issues on China regional metallogeny [J]. Journal of China University of Geosciences, 2000, 11(3): 220-227.
- [10] 翟裕生. 中国区域成矿特征的探讨 [J]. 地质与勘探, 2002, 38(5): 1-4.
- [11] Gamyaniy G N, Bortnikov N S, Prokofiev V Yu, et al. Major gold and silver deposits of North-Eastern Russia: Descriptive models [M] // Colin J. Digging Deeper: Proceedings of the Ninth Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits. Dublin, Ireland: The Irish Association for Economic Geology, 2007: 633-636.
- [12] 何登发, 赵文智, 雷振宇, 等. 中国叠合型盆地复合含油气系统的基本特征 [J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 23-37.
- [13] Zhai Y S, Deng J, Song H. Synchronous structure control of super ore deposits [J]. Science in China (Series D), 1998, 41 (Supp): 7-12.
- [14] Burchfiel B C. Plate tectonics and continents: a review [M] // Continental Tectonics. Washington D C: National Academy of Sciences, 1980: 15-25.
- [15] 翟裕生. 古大陆边缘构造演化和成矿系统 [M] // 北京大学. 国际地质科学学术讨论会论文集. 北京: 地震出版社, 1998: 769-778.
- [16] 翟裕生, 邓军, 王建平, 等. 深部找矿研究问题 [J]. 矿床地质, 2004, 23(2): 142-149.
- [17] Stephen E K, Bruce H W. Derivation of global metallogenic and resource data from ore-deposit age-frequency distributions [M] // Colin J. Digging Deeper: Proceedings of the Ninth Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits. Dublin, Ireland: The Irish Association for Economic Geology, 2007: 7-10.