

# 成矿系统研究及其资源、环境意义

翟裕生, 邓 军, 彭润民, 王建平

(中国地质大学, 北京 100083)

**摘 要:** 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。成矿系统理论要点是: 成矿是一个由发生、持续到终结的开放的复杂动力系统; 成矿作用产物包括矿床系列和异常系列, 它们共同构成矿化网络; 成矿系统研究的是矿床形成、变化、保存的全过程; 成矿系统的研究, 必须与成矿背景环境的研究一体化, 并按构造动力体制进行分类。成矿系统研究的三重意义在于: 推动成矿学的深入发展, 并有利于矿床学与地球科学其它分支学科的相互渗透; 在找矿预测中建立战略观点和整体思路, 促进区域找矿和资源潜力评估工作; 研究成矿系统中有害组分的污染程度, 为矿区环境质量评估和环保工作提供科学资料。论文指出以系统观和历史观相结合的研究方法, 将使资源和环境服务的成矿系统研究得到进一步发展。

**关 键 词:** 成矿系统; 结构; 演化; 预测找矿; 环境保护

中图分类号: P61

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2002)01-01-08

已经有百年历史的矿床学在进入 21 世纪后正面临着新的机遇和严峻挑战。为满足矿产开发和环境保护统筹兼顾以实现可持续发展的社会需求, 矿床学研究要与时俱进, 转变观念, 拓宽领域。因此, 既要深入研究成果规律, 以更有成效地指导矿产勘查; 又要主动服务于矿业环保, 参与研究和构筑新的资源 - 环保相融合的知识体系。这是新世纪中矿床学研究相辅相成的两个基本方面。而新近兴起的成矿系统及演化理论研究可以兼顾这两方面的基础内容, 将能为实现资源开发与环境保护一体化提供科学依据, 发挥积极作用。

## 1 成矿系统研究要点

成矿系统观念是在长期的矿床研究和矿产勘查实践中逐步形成的, 是试图运用系统观和历史观综合研究复杂的成矿现象, 深入认识成矿规律的一种科学探索。成矿系统研究涉及成矿物质来源、流体运移通道、矿石堆积场所等一系列地质体、地质现象和地质作用, 强调物质、运动、时间、空间、形成、演变等的融合与统一。这也体现了矿床学向系统化、信息化方向发展的趋势。近 10 年来, 李人澍<sup>[1]</sup>、翟裕生<sup>[2~7]</sup>、於崇文<sup>[8,9]</sup>、关广岳<sup>[10]</sup>等对成矿系统理论和方法有较深入的论述。

据作者理解: “成矿系统是指在一定地质时空域中控制矿床形成、变化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

基金项目: 国土资源部地质调查项目专题(No.: K1.4-1-5); 中国地质调查局项目(No. 200110200069) 联合资助。

第一作者简介: 翟裕生, 男, 1930 年生, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 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。

一个自然系统<sup>[4]</sup>。

由上述可见,成矿系统概念中包括了成矿的地质环境、控矿要素、成矿作用过程、成矿产物(矿床系列和异常系列)及矿床形成后的变化与保存等,几乎涵盖了有关成矿学的基本内容。成矿系统理论的要点包括以下四个方面。

(1) 成矿系统是地球物质系统的一个组成部分,是产在一定地质构造环境中开放的复杂动力系统,与所在的环境之间进行着物质、能量和信息的交换,以达到成矿物质高度浓集。成矿系统的发生起因于多种成矿因素的耦合和临界转变;成矿系统的持续是由于它具有非线性反馈的动力学机制和自组织能力,从而能自动排除作用过程中的各种干扰,保持完整的成矿过程;成矿作用的终结或由于成矿物质消耗殆尽,或由于成矿能量过大,或自组织能力减退,而使系统进入“混沌”的无序状态,从而结束了成矿过程。

(2) 成矿系统的作用产物包括矿床系列和异常系列两个部分。矿床系列包括不同矿种、不同类型、不同规模的矿床(点),它基本相当于常用的成矿系列一词,是指有成因联系的矿床组合。异常系列是指与矿床伴生的各类异常(地质的、地球化学的、地球物理的...)的组合。之所以将异常系列包括在成矿系统之内,是由于这些异常是成矿作用产物的一个有机组成部分,其中蕴含着多种有关成矿系统的信息(如矿源环境、流体类型、作用强度、作用时、空范围等)。研究各种异常的组成和分布,有助于认识成矿系统的全貌和全过程。各种异常又是最有效的找矿标志,尤其是异常的浓集区、转变区和叠加区等。

(3) 成矿系统理论还包括了矿床形成后的变化、破坏和保存等内容<sup>[11]</sup>。这是因为,成矿系统是一种自然历史过程,除现今大陆热泉成矿系统和洋底热液成矿系统外,绝大多数成矿系统不能直接观察,成矿系统作用过程及以后经历地质变化的各种信息被保存在现存矿床及有关异常中。因此,研究成矿系统要从现在的矿床特征及现存的地质环境入手,再反推其原来的成矿环境和成矿过程。地质科学是历史性科学,将今论古也是研究成矿系统的重要方法。反之,在对成矿系统的发生和演化历史有了基本认识后,对于预测各类矿床的保存和分布情况以及区域矿产资源潜力评估就更有科学依据。因此,成矿系统研究包括成矿后变化内容,是有其理论依据和实际意义的。

(4) 成矿作用与成矿环境统一研究是现代成矿学的特点之一。众多的研究实例表明,在成矿环境诸因素中,构造运动是最基本的因素。大型构造的形成和演化,不仅控制着有关的沉积、岩浆、变质和流体作用,它还是成矿系统的热动力来源之一,是导致各类成矿物质迁移、富集以形成大矿、矿集区的基本条件。因此,作者提出,从构造-成岩-成矿和构造-流体-成矿的观点出发,以构造动力体制(tectono-dynamic regime)作为划分成矿系统大类的依据。其可分为:伸展构造成矿系统类;挤压构造成矿系统类;走滑构造成矿系统类;隆升构造成矿系统类;沉降构造成矿系统类;大型韧性剪构造成矿系统类;再加上由地外动力引起的;陨击构造成矿系统类<sup>[5]</sup>。每一类构造动力体制都有其特定的构造组合、岩石建造和成矿系统。在上述分类基础上,再按成矿机理划分出岩浆成矿系统、热液(水)成矿系统、沉积成矿系统、生物成矿系统和变质成矿系统等,在每一成矿系统中可再进一步按含矿建造和产出环境划分亚系统。

上述各要点可以概括在成矿系统及演化的结构图中(图1)。图中显示了成矿系统中各部分、各要素间的相互联系和相互作用,也表现了成矿系统研究是着重从区域尺度探讨矿床的成矿背景、形成过程和后来演变的。

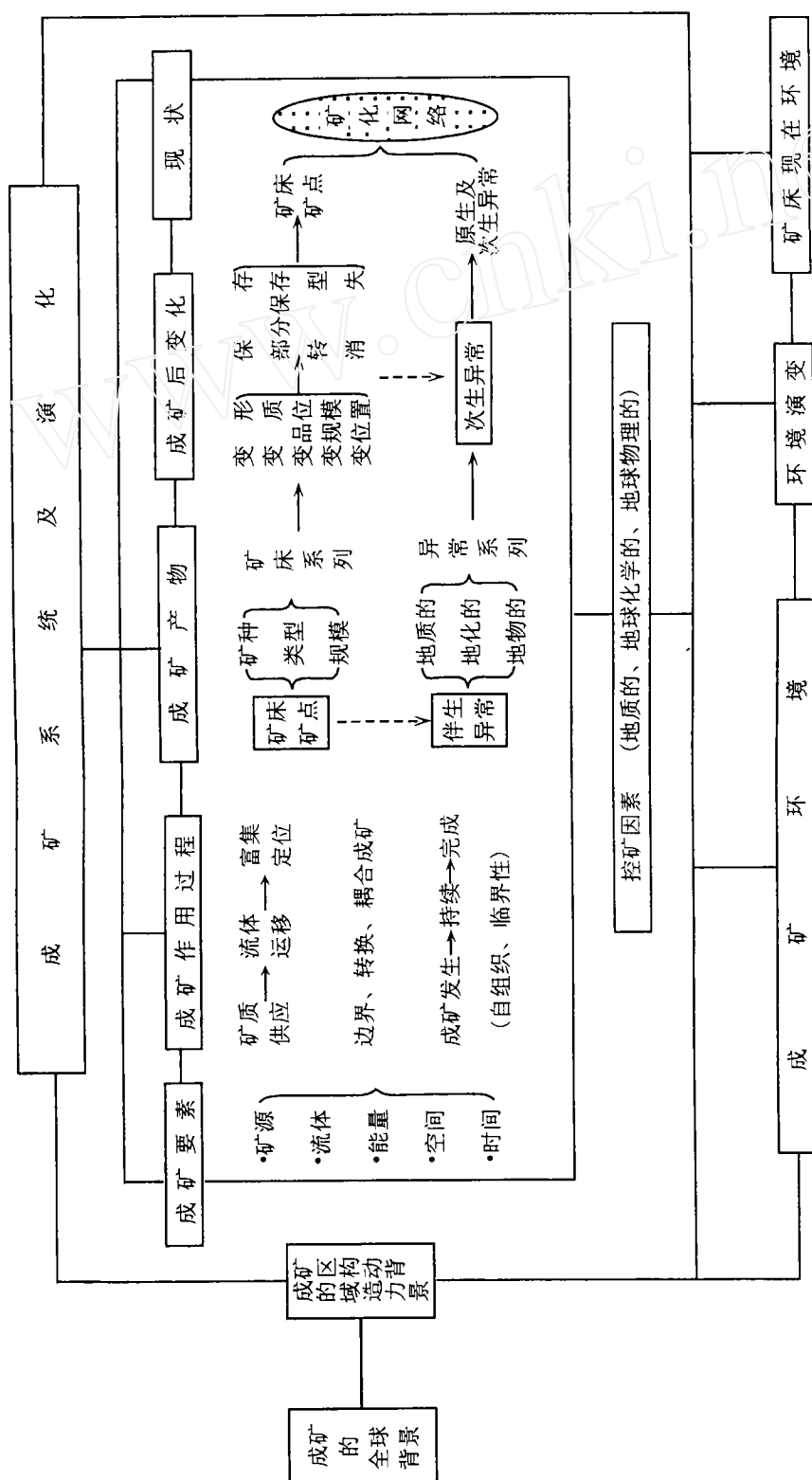


图1 成矿系统及其演化结构图

Fig.1 Structure of metallogenic system and its evolution

作者曾以长江中下游地区中生代岩浆热液成矿系统<sup>[12,13]</sup>和华北古陆边缘代表性成矿系统<sup>[3]</sup>为典型实例,具体剖析了区域成矿系统的研究内容与方法,限于篇幅,不再赘述。

## 2 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。如何运用成矿系统理论指导找矿,是大家关心的问题,现提出几点认识供参考。

### 2.1 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,如找寻金矿、铁矿、铜矿、找斑岩型铜矿、构造-蚀变岩型金矿等。这种“单打一”的找矿对象,在计划经济时期多个工业部门分列和专门找矿工作中是常见的,无可厚非,但这终究限制了找矿者的广阔视野,也造成了有可能避免的浪费。

当今,我国的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眼光,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。例如,安徽冬瓜山大型铜矿的发现就是运用了矿床组合、成矿系列的思路<sup>[14]</sup>。

### 2.2 从矿化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,再据以追溯矿体。因此,深入研究矿致异常,应该成为区域成矿找矿的一项基本内容。

在成矿作用中产生的各类异常——地质的、地球化学的、地球物理的异常,或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-异常网络或简称矿化网络(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。由于矿致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。

### 2.3 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被改造的阶段。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。

用历史分析方法研究矿床和成矿系统的“来龙去脉”是很必要的。对每一个矿床都要予以探讨:曾经历过哪些遭遇?是原状,还是残破状?是原来的规模(储量),还是剩余储量?以及被损失的储量到哪里去了……?调查和基本摸清这些问题,对于正确评价矿床是很有帮助的。由此还可进一步认识到,过去的区域成矿研究工作中,多只注重成矿条件,即有利成矿地质因素的研究,而对于矿床形成后保存条件的研究是忽视的。基于前述理由和实际找矿经验,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,不只要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。

除上述的预测找矿和矿产资源潜力评价意义外,成矿系统研究还可提供有关矿产共生、伴生的精细资料,为矿产资源的综合开发、综合利用,提高资源的利用率服务。

### 3 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<sup>[15,16]</sup>。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。本文试从成矿系统的角度,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的或有用的。

(2) 矿床构造及矿体产状 研究矿体及围岩的组成、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,又有益于掌握与采矿过程中的地面沉降、滑坡、地震等灾害密切相关的问题。

(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露出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 2。

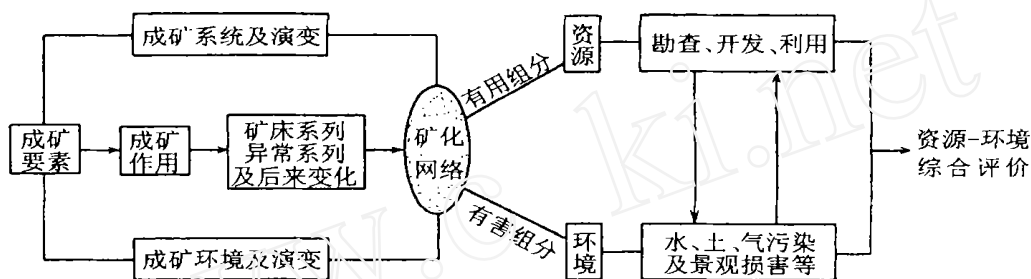


图 2 成矿系统研究的资源、环境效应

Fig. 2 Mineral resource and environmental effects of the study on metallogenic system

## 4 成矿系统研究的理论意义

成矿系统研究除上述的资源、环保意义外,其理论意义包括 2 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成矿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。又如,中元古宙和显生宙的一些 Sedex 型矿床的发育说明成矿时当地处在拉张构造环境(裂谷、裂隙槽等)。类似这样的例子还有不少,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其它学科的研究中去,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,上述现象将能有显著改变。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。

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的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,但它将能得到进一步的发展。

致谢 蒙学报主编王德滋院士和编辑部盛情约稿;蔡克勤、肖荣阁、杜杨松、崔彬等教授多次参与论文有关内容的研究,一并在此表示感谢。

## 参考文献(References):

- [1] 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.  
Li Renshu. Theory and practice of metallogenic system analysis. Beijing: Geological Publishing House, 1996, 19-20.
- [2] 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.  
Zhai Yusheng. Tectonic evolution and metallogenic systems in paleocontinental margins. In: Geology Department of Peking University ed. A symposium on International Geosciences at Peking University. Beijing: Seismological Publishing House, 1998. 769-778.
- [3] Zhai Yusheng, Deng Jun, Xiao Rongge and Peng Runmin. Tectonic setting and metallogenic system of North China Block margins. Journal of China University of Geosciences, 1999, 10(1): 30-33.
- [4] 翟裕生. 论成矿系统. 地学前缘, 1999, 6(1): 13-27.  
Zhai Yusheng. On the metallogenic system. Earth Science Frontiers, 1999, 6(1): 13-27.
- [5] Zhai Yusheng, Peng Runmin, Deng Jun and Wang Jianping. Analysis of mineralization system and prediction of new-type ore deposits. Journal of China University of Geosciences, 2000, 11(2): 107-121.
- [6] 翟裕生. 成矿系统及其演化——初步实践到理论思考. 地球科学, 2000, 25(4): 333-339.  
Zhai Yusheng. Metallogenic system and its evolution: from preliminary practice to theoretical consideration. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(4): 333-339.
- [7] 翟裕生, 彭润民, 邓军, 王建平. 区域成矿学与找矿新思路. 现代地质, 2001, 6(2): 151-155.  
Zhai Yusheng, Peng Runmin, Deng Jun and Wang Jianping. Regional metallogeny and exploratory thinking. Geoscience, 2001, 6(2): 151-155.
- [8] 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.  
Yu Chongwen. Ore-forming dynamics—theoretical system and methodology. Earth Science Frontiers, 1994, 1(3): 54-82.
- [9] 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.  
Yu Chongwen, Cen Kuang, Bao Zhengyu, et al. Ore-Forming Dynamics. Beijing: Geological Publishing House, 1998, 1-23.
- [10] 关广岳. 地球面临混沌边缘. 沈阳:东北大学出版社, 2000. 69-74.  
Guan Guangyue. Earth towards the edge of chaos. Shenyang: Northeastern University Publishing House, 2000, 69-74.
- [11] 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. 地球科学, 2000, 25(4): 340-345.  
Zhai Yusheng, Deng Jun and Peng Runmin. Research contents and methods for post-ore changes, modifications and preservation. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(4): 340-345.
- [12] Yusheng Zhai, Yongliang Xiong, Shuzhen Yao and Xinduo Lin. Metallogeny of copper and iron deposits in the East Yangtze Craton, east-central China. Ore Geology Reviews, 1996, 11, 229-248.
- [13] 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. 1-198.  
Zhai Yusheng, Yao Shuzhen, Cui Bin, et al. Study on Metallogenic Series. Wuhan: China University of Geology Publishing House, 1996, 1-198.
- [14] 常印佛, 刘湘培, 吴宜昌. 长江中下游铜铁成矿带. 北京:地质出版社, 1991, 287-293.  
Chang Yinbo, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. The Copper-Iron Ore Belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River. Beijing: Geological Publishing House, 1991, 287-293.
- [15] 翟裕生. 矿床的环境质量——一个新的地学研究领域. 现代地质, 1998, 12(4): 462-466.  
Zhai Yusheng. Environmental quality of ore deposit—a new research field of geosciences. Geoscience—Journal of Graduate School, China University of Geosciences, 1998, 12(4): 462-466.
- [16] 翟裕生. 21 世纪矿床学研究展望——矿床学为可持续发展服务的几个领域. 中国地质, 2000, 第 3 期: 14-17.  
Zhai Yusheng. Prospective on the study of ore deposit geology in the 21st century—several serving fields on sustainable development for ore deposit geology. Geology of China, 2000, No. 3, 14-17.

## Study on Metallogenic System and Its Significance to Mineral Resource and Environmental Protection

ZHAI Yu-sheng, DENG Jun, PENG Ru-min and WANG Jiang-ping

(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract :** Metallogenic system refers to a natural system with ore-forming function and within certain geological time-space zone. It includes the geological factors controlling ore-formation and preservation, the ore-forming processes and their products. The essentials of metallogenic system theory contain four major points: Ore-formation is a complex dynamic process including its on-set, continuation and finish; The products of ore-forming processes include ore deposit series and anomaly series. They together compose the ore-forming network; Metallogenic system studies the whole process of formation, change and preservation of mineral deposits; The metallogenic systems are investigated under certain ore-forming geological settings, and classified by tectono-dynamic environments. The significance of metallogenic system study lies in: to promote the development of metallogeny and benefit the mutual penetration between ore deposit geology and other disciplines of geosciences; to build strategic view and integrated thought in ore prediction and prospecting to accelerate regional ore exploration and mineral resource potential assessment; To provide scientific base for evaluation of environmental quality and environmental protection by studying noxious contents in metallogenic systems and their pollution. Combining the systematic and historical points of view, the study on metallogenic system will develop further to serve the mineral resource supply and environmental protection.

**Key words :** metallogenic system; structure; evolution; ore prediction and prospecting; environmental protection.

(收稿日期:2002-01-03)