

# 走向 21 世纪的矿床学

翟裕生

(中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

**提 要** 文章简要回顾了百年来矿床学取得的重要进展,包括:①矿床成因分类的建立;②层控矿床研究与矿床多成因理论的兴起;③板块构造与区域成矿规律;④矿床模型;⑤超大型矿床研究;⑥海洋现代热液成矿作用的发现;⑦成矿演化的不可逆性与节律性等。针对 21 世纪中人类社会可持续发展的需要,矿床学研究出现了两个新趋势:①全球化;②矿业开发与环境保护一体化。面临着三个主要研究领域:①成矿理论的推陈出新;②研究开发新型矿产资源,建立广义的矿产资源地质学;③建立绿色矿业体制所需的矿床学基础研究。

**关键词** 矿床学 回顾 21 世纪 展望 全球化趋势 矿业与环保的协调

**中国法分类号:** P61

**文献标识码:** A

矿床学(矿床地质学)是研究矿产资源形成与分布规律的科学,它是矿产勘查和开发的地质理论基础,又是地球科学的重要分支。这门古老而又常青的学科对人类社会、经济和科技的发展作出过重大的历史贡献,现在正面临着新的机遇和严峻挑战。

## 1 矿床学研究历史回顾

19 世纪末叶,矿床学从地质学中开始独立出来,逐步建立了基本的理论体系。20 世纪工业化进程对矿产资源的大量需求,推动了矿床学的发展,取得了多方面的重要进展。

### 1.1 矿床成因研究及矿床分类的建立

矿床成因是矿床学研究的基础与核心,而成因研究是建立在对开采矿山的地质矿化现象的长期反复观察以及运用物理化学原理解释矿化现象的基础上的。20 世纪初期以来,由于工业经济逐步发展,被开采的矿床日益增多,矿床地质资料日趋丰富。人们用物理化学原理解释成矿现象,概括成矿方式,逐步认识到不同的矿种、不同的成矿要素在不同的成矿环境中发生不同的成矿作用,因此,提出了多种矿床成因观点(如岩浆分异成矿、热液成矿、岩浆贯入成矿、火山喷气成矿、测分泌成矿、沉积成矿和变质成矿等),并以矿床成因为基础,对矿床进行了分类研究,其中以美国地质学家 W. 林格伦(1907,

1933)所提出的矿床分类表最具代表性并且影响深远。他以成矿物理化学作用为基础,划分出岩浆中的、岩石中的、水体中的三类 17 种矿床类型。这代表了当时的矿床学研究水平,在此基础上逐步演变成被广泛应用的内生、外生、变质三大类成矿作用的分类体系。

### 1.2 层控矿床研究和矿床多成因理论的兴起

20 世纪中叶以来,层控矿床(A. Maucher 等为代表)和矿石岩石学(R. Stanton 等,1972)兴起,对矿床成因认识有突破性进展,使矿床研究中关于水成与火成、内生与外生、同生与后生的长期争论逐步地基本统一起来,这极大地开阔了研究视野,也给找矿工作带来了新的生机。原因是当时矿冶技术发展迅速,已大量利用层状岩石中的贫矿石,矿山深部开采提供了更丰富的成矿现象。而矿物包裹体、同位素地质、微量元素、热力学和成矿实验等广泛用于矿床成因研究,也加深了对矿源、流体、矿石堆积作用等的复杂性的认识,从而逐步形成了被广泛认同的矿质多来源、成矿多阶段、矿床多成因的观点。在我国,层控矿床地球化学研究(涂光炽等,1984)对阐明成矿机理发挥了重要作用。

### 1.3 板块构造与区域成矿规律

70 年代以来板块构造学说广泛传播,推动了区域成矿研究。P. Guild(1972)和 F. J. Sawkins(1972)等联系板块构造阐述斑岩铜矿、块状硫化物

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,主要从事金属矿床学和区域成矿学方面的教学和科研工作。

收稿日期 2001-01-08; 改回日期 2001-02-01。李 岩编辑。

矿床的分布规律,对板块边界金属矿带的成因作了较全面的解释,开拓了用活动论观点研究全球成矿背景的新途径。原因是大地构造研究和区域地质调查及制图已广泛开展,深部地球物理资料有较多积累,古地磁研究方兴未艾,已基本认识到大洋板块的活动规律……从而为深入探讨大地构造与成矿规律创造了条件。80年代以来已扩大到对大陆动力学及区域成矿学的研究。P. Laznicka(1993)曾系统论述了前寒武纪的区域成矿规律。在我国,运用板块构造和其他构造观点,对主要成矿区带的地质背景和成矿规律作了广泛研究,提出了区域成矿系统等观点(翟裕生等,1999)。

#### 1.4 海底现代成矿作用的发现与研究

60年代中期以来,由于洋底探测技术的进步,首先在红海轴部海渊发现了含金属热卤水和沉积物,与此同时在东太平洋海隆的沉积物中,识别出热液成因的金属组分;其后又在多处扩张洋脊中发现了高温黑烟囱、块状硫化物和奇异的喷口生物群(K. Sawyer, 1999)。此外,俄罗斯科拉半岛的科学深钻中,在8~9 km深处发现了矿化卤水。最近, S. 斯科特等(2000)<sup>①</sup>已收集到150处海底现代热液活动和金属硫化物堆积的资料。这些新发现的现代成矿作用,不仅形成了有开发前景的新的矿产资源类型,也提供了可观察“现代矿床”形成过程的天然实验室。

#### 1.5 矿床模式研究

矿床模式是指在研究大量矿床的基础上,根据对矿床地质特征、产出环境、矿床成因的综合概括而建立起来的对某一类型矿床描述性的、定性-定量的和图示性的模型。如斑岩铜矿模式、VMS矿床模式、SEDEX矿床模式。矿床模式的研究,使人们对该类矿床的特征能有一个更概括性、更本质性的了解,减少了地质不确定性的影响,提出了清晰的找矿思路和找矿方向,从而提高了矿产勘查的效果。如著名的斑岩铜矿模式(R. Sillitoe, 1973)对新矿床发现起了重要作用。自70年代至今,国际上已建立了上百个矿床模式,而且专家们对改进和完善矿床模式的研究至今热情不减。

#### 1.6 超大型矿床的发现和和研究

超大型矿床以其巨大规模和极为罕见而具有重大的经济、社会和科学研究意义,很多工矿城市就是在开发超大型矿床的过程中建立起来的(如加拿大

的肖德贝里市、中国的金昌市等)。60年代以来世界上陆续发现了一批重要的超大型矿床,特别是1975~1976年Olympic Dam矿床的发现,其独特的地质背景、矿物组合和巨大储量,在世界首屈一指,是矿床学和找矿学的重大突破,并开拓了研究金属巨量富集机理的新领域。Laznicka(1983)、涂光炽等(2000)、Singer(1995)等提出了对超大型矿床形成条件的规律性认识。由于当今浅表矿床日益减少,矿业成本包括矿山环保成本不断增加,国际勘查界已将找寻大型、超大型矿床作为主要目标,以便获得巨大效益。而地球物理、地球化学和遥感技术的进步并与成矿地质条件研究紧密结合就使实现这一目标成为可能。

#### 1.7 成矿演化的系统研究

成矿年代测定对认识各地区的成矿时代和探索地质历史上成矿的演化趋势有重要意义。基础地质科学尤其是地史学的进步,全球、大洲地质构造图的编制以及成矿年代同位素方法的建立等为成矿演化研究打下了基础。在积累了大量相对成矿年代和绝对成矿年代(同位素年代学)资料的基础上,学者们发现地史上成矿演化是不可逆的(C. Meyer, 1981),带有突变性和节律性。每一地质时代中都有特定的成矿系统,产出一定的矿种和矿床类型,包括超大型矿床,都有其特定的形成时代和相应的矿床类型。这受整个地球,包括地壳、水圈、大气圈、生物圈的演化背景的控制。认识地史中的成矿演化过程和一些规律性对于区域成矿预测、树立新的战略找矿思路是很有意义的。

除以上七个方面外,热力学分析、矿物包裹体、同位素地球化学、微量元素和稀土元素、成矿实验等对阐明成矿环境、矿质和热液来源等都起了重要作用。在成矿系列、花岗岩类与成矿、变质作用与成矿、生物有机质与成矿、热水沉积成矿、构造成矿、沉积成矿、风化壳发育与成矿及地质流体成矿等方面也取得了相当的进展,限于篇幅,不再详述,但这丝毫不会降低上述研究在矿床学发展中的重要意义。

20世纪矿床学研究的重要进展使广大矿产勘查工作者能运用认识到的成矿规律指导矿产勘查,从而发现并开发了成千上万个矿床,保证了人类经济、社会发展对矿产资源的巨大需求,并在工业化基础上创造了史无前例的物质文明和精神文明。

① 据 S. 斯科特在中国地质大学(北京)的学术报告,2000年3月27日~29日。

## 2 矿床学面临的新形势和新需求

矿产是人类社会赖以生存和发展的重要自然资源。随着社会生产力的提高和人民生活质量的改善,人类使用矿产的种类和数量在急剧增长。据统计,近半个世纪以来,全球的矿产开采量已超过人类几千年历史中开采矿产量的总和。20 世纪以前人类共采掘铜约 3 200 t,而 20 世纪的百年中产铜 2.38 亿吨。过去没有发现和利用的铀、钍、镓、锗及稀土元素等,目前都已成为重要的能源、高技术产业原料和战略资源(陈毓川等,1999)。现今,人类每年消耗各类矿物资源达 500 亿吨。

随着全球人口的增长和人民生活质量的提高,将需要更多品种和更大数量的矿产资源。据 31 届国际地质大会(2000 年 8 月,巴西里约热内卢)统计,人类对金属矿产的需求到 2050 年将是现今需求量的 5 倍。而金属的回收利用只能解决其中的一小部分,主要还需靠新的矿山来提供。至于对新的能源基地的发现与开发更是十分急迫。因此,在百年来取得成绩的基础上,大力加强找矿勘探工作的地质理论基础——矿床地质学的研究,已成为 21 世纪地球科学的重大任务之一。在这方面,矿床学面临着五个方面的需求,也可以说是挑战。

首先,在很多国家和地区,找寻隐伏矿床已成为矿产勘查的主要任务。这需要新的研究思路与方法,即不只是详细研究矿床本身,而且要系统研究成矿的构造背景、地质环境和矿床形成及形成后演变的全过程,使矿床学研究建立在全球和区域的地质构造研究基础上。因此,矿床学家应该学习和运用地球科学各分支学科的最新研究成果,学习并运用数学、物理学、化学、生物学和天文学的基本原理,从这些基础学科中吸收新的营养,并广泛运用新技术和新方法,以便有成效地进行对矿床学重大问题的研究,如壳-幔相互作用与成矿、地史上重大事件与成矿、成矿系统及成矿作用动力学、地质流体与成矿等。通过这些方面的研究,将成矿理论提到一个新的高度,以便更好地指导 21 世纪的矿产资源勘查。

第二,对已发现矿床的合理开发利用需要对矿床学的深入研究。最近召开的党的五中全会,针对我国普遍存在的对矿产资源的滥采、乱挖和矿床有用组分利用率低的现状,明确提出“要合理使用、节约和保护资源,提高资源利用率”。为实现这一目

标,要在矿床勘查、开采和选冶过程中,充分利用现代成矿学的研究成果,加强对矿床物质组成、构造、结构、产出状态和所在地区经济技术条件以及水文、气候等特征的研究,以便做到对矿产资源的合理开发、综合利用,实现物尽其用。特别是由于我国大陆具有复合-活动大陆特征,不少地区构造-岩浆活动多期次叠加,造成复杂成分矿石、难选冶矿石占较大比例,因此,综合开发、综合利用更应成为我国的一项基本技术策略。精细的矿床学研究将为此提供科学的基础资料。

第三,为开发新型矿产资源,实现矿产资源更新换代所做的矿床学研究。21 世纪的经济发展和科技进步,使人类在大家所熟悉的传统矿产外,需要并能够发现更多的新类型矿产,包括海洋矿产、深部矿产和外星矿产等,以实现矿产资源更新换代和持续供应,保证人类社会的可持续发展。在研究、发现和开发新型矿产的过程中,矿床学研究将发挥不可替代的作用。

第四个挑战是矿业开发与生态环境保护的协调发展问题。历史上的矿业开发为人类发展作出了重大贡献,但也污染和损害了环境,大量消耗了能源。当今,保护环境,为子孙后代留下美好河山和国土资源,已成为我国的一项基本国策。因此,如何使矿业开发和环境保护能统筹兼顾,即实行无污染、低能耗、低水耗、短流程、高效益的“绿色矿业”、“清洁矿山”的新体制,将是整个矿业界面临的新的重大课题。这也是对矿床学研究提出的新挑战,要求矿床地质勘查工作者要树立环保意识,在与矿业环保工作的协调中,拓展和更新矿床地质及矿产勘查学的内容。例如,寻找经济效益高而有害组分少的新矿床类型以减少环境污染,研究矿床的环境质量,参与进行矿床环境质量评价等。在这方面,有很多过去不熟悉而一定要进行的工作已经摆在矿床地质学家的面前。

第五,为合理利用两种资源、两个市场而进行的矿床学研究。矿产资源是有赖于全球配置和市场配置的经济资源,21 世纪矿业发展的一个重大趋势是全球化,它把世界矿业经济联系得更加紧密。矿业全球化加快的背景和我国即将加入世贸组织的形势,对我们利用两种资源、两个市场既是机遇,也是挑战。为了适应这一形势,我们要在摸清国内资源比较优势的基础上,大力研究世界范围内主要矿产的形成与分布规律、各国矿产资源供求状况、全球矿

业发展态势以及与市场需求的矿产可供性等,以便知己知彼,提高我国地质勘查工作和矿产资源的国际竞争能力,充分、主动地利用国内外两个市场、两种资源,建立矿产资源的可持续供应体系,保证国家的经济和社会安全。

### 3 21世纪矿床学发展的二个趋势和三个研究领域

世纪之交的地球科学研究正出现两个大的趋势: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经济社会发展和人民生活,为实现可持续发展发挥着重大作用。作为地球科学重要分支的矿床学和它服务的矿产勘查开发正处在转折时期,这表现在,对矿产资源寻找的视野越来越开阔,逐步从地壳表层走向深部,从陆地走向海洋,从区域走向全球,从单纯的注意矿产资源的找寻逐步转移到以可持续发展为目标的资源合理开发利用与环境保护并重上。也就是矿床学研究正面临着全球化和矿产资源开发与环境保护的一体化两大趋势。这两个趋势将在相当长的时期内制约矿床学的研究方向和基本任务(翟裕生,2000)。

基于上述分析,预估新世纪初乃至上半叶矿床学的主要研究领域有以下三个方面。

#### 3.1 立足全球,深入研究成矿规律,显著提高找矿成效

当前国际成矿学研究的主要趋势是基于地球动力学、流体地质学和非线性科学等前沿科学的新思路,探索巨量金属堆积的机理,发展寻找大矿和矿集区的新理论和新方法。同时,全球成矿图的编制和对全球成矿规律的探索也日益引起人们的关注。为了合理利用国外资源,我们要积极参与全球矿产分布规律研究;为了能从全球成矿的高度来认识中国区域成矿特点,也要加强对全球成矿学的探索。我国地处三大板块的结合部,成矿复杂多样,如东部中生代、西北部古生代和西南部新生代的区域性大规模成矿问题就很有特色(毛景文等,1999),深入研究和认识其时空演化规律,不仅能丰富和发展大陆成矿理论,为全球成矿学做出贡献,也为发展新一代的成矿预测方法,为找寻中国已有矿产基地的接替资源和发现新的资源基地提供科学依据。要实现这个目标,就需要对全球构造与成矿、区域成矿学、成矿

年代学、成矿动力学、流体成矿、生物成矿、成矿演化、矿床地球化学等领域展开更加深入的研究。特别是将这些基础研究与矿床模式研究相结合,以作为找矿预测的有效工具。

#### 3.2 依靠科技进步,研究开发新型矿产资源,扩大资源领域

实现社会可持续发展,资源的充足供给是一个重要基础。为此,矿床学研究除了要发展完善其理论以便指导常规矿产资源的勘查外,还要预测和发现新的非常规矿产资源,这也是保证矿产资源可持续供应的一个重要途径。为此矿床学研究将与相关学科密切结合,采用高新技术,研究和发掘多种矿物、岩石和地质体的有用性,为开发新型矿产资源作好基础研究工作,包括新的成矿作用、新矿床类型、新成矿环境、新矿种、新性能以及矿床组成物质的综合利用等。在研究开发新型矿产资源时,低消耗和无污染的矿产类型将受到特别关注,有极大的应用前景。为解决这些问题,矿石学、矿石岩石学、非金属矿床学、矿物物理学、矿石工艺学、岩矿材料科学以及选冶科学等学科将发挥重要作用。过去对金属、非金属、能源矿产的分门别类研究将互相融通,从自然资源系统的整体来研究各类矿产间的相互关联和作用,并逐步建立起大地质资源学或广义的矿产资源地质学的知识体系。

#### 3.3 评价矿床环境质量,改善矿区生态环境,加强为保护环境的矿床学研究

实现社会的可持续发展需要一个良好的生态环境,这就要求尽量减少和避免矿业活动对环境造成的损害,因此必须发展“绿色矿业”,使资源合理利用与环境保护并重。为了实现这一目标,矿床研究者要开拓新的研究领域,加强与矿山废物综合利用、采选冶方法革新和矿床环境质量评价有关的矿床学基础研究,并积极寻找发现经济-环境综合效益好的新类型矿床。为实现矿业开发和环境保护的一体化,矿产资源科学、环境科学之间的交叉渗透并出现新的交叉学科和研究领域将是必然趋势。

总之,展望21世纪初期的矿床学研究将可能出现以下的新进展:

- (1) 矿床地质学→区域成矿学→全球成矿学;
- (2) 常规与非常规矿产资源研究结合以及固态、液态、气态矿产间的综合研究→大地质资源学;
- (3) 矿业开发与环境保护并重的多学科研究→矿产资源-环境地质学;

(4) 充分利用高新技术→信息时代的新矿床学。

还应指出的是,21 世纪地球科学各学科间将更加紧密地结合与融通,莫基于各地质基础学科之上的矿床学研究成果,也将能广泛地应用到其他有关的学科中去,促进整个地球科学的发展。矿床学基础知识也将丰富科普工作内容,为提高广大人民的科学文化水平服务,并促使全民族自觉地保护和合理利用矿产资源,使矿床学全面地为社会可持续发展服务。

#### 参考文献

- 陈毓川,李廷栋,彭齐鸣,等. 1999. 矿产资源与可持续发展[M]. 北京:中国科学技术出版社. 1~16.
- 毛景文,华仁民,李晓波. 1999. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区[J]. 矿床地质, 18(4): 291~299.
- 涂光炽主编. 1984. 中国层控矿床地球化学, 卷一[M]. 北京:科学出版社.
- 涂光炽,等. 2000. 中国超大型矿床(I)[M]. 北京:科学出版社, 3~9.
- 翟裕生,邓军,李晓波. 1999. 区域成矿学[M]. 北京:地质出版社.
- 翟裕生. 2000. 21 世纪矿床学研究展望[M]. 中国地质, (3): 14~17.
- Guild P. 1972. Metallogeny and the new global tectonics[A]. 24th International Geological Congress, Section 4, Mineral Deposits[C]. 17~24.
- Laznicka P. 1983. Giant ore deposits, a quantitative approach[J]. Global Tectonic and Metallogeny, (2): 41~63.
- Laznicka P. 1993. Precambrian empirical metallogeny[M]. Amsterdam: Elsevier. 1~1620.
- Lindgren W. 1907. The relation of ore deposition to physical conditions[J]. Econ. Geol., 2: 105~127.
- Lindgren W. 1933. Mineral Deposit[M]. 4th ed., New York: McGraw-Hill Book Company.
- Maucher A, Schneider H. 1967. The Alpine lead-zinc ores[J]. Econ. Geol., Monograph, 3: 71~89.
- Meyer C. 1981. Ore-forming processes in geological history[A]. In: Skinner ed Econ. Geol. —Seventy-Fifth Anniversary Volume[C]. El Paso, Texas: The Econ. Geol. Publishing Company. 6~41.
- Sawkins F. 1984. Metal deposits in relation to plate tectonics[M]. Berlin: Springer-Verlag. 283~294.
- Sawyer K. 1999. Expedition-in U-Boot zu den Schwarzen Rauchern[J]. Geowissen, (24): 54~65.
- Singer D. 1995. World class base and precious metal deposits, a quantitative analysis[J]. Econ. Geol., 90: 88~104.
- Stanton R. 1972. Ore Geology[M]. New York: McGraw-Hill Book Company. 7~35.
- Sillitoe R. 1973. The top and bottom of porphyry copper deposits[J]. Econ. Geol., 68: 799~815.

## Mineral Deposit Geology towards the 21st Century

Zhai Yusheng

(China University of Geosciences, Beijing 100083)

**Key words:** mineral deposit geology, retrospect, the 21st century, prospect, globalization, harmony between mining industry and environmental protection

#### Abstract

Some major achievements in mineral deposit geology in the past 100 years are briefly reviewed in the paper. Such achievements include: ①classification of mineral deposits by their genesis; ②booming of study on strata-bound deposits and multigenesis theory of mineral deposit; ③plate tectonics and regional metallogeny; ④mineral deposit model; ⑤study on superlarge mineral deposits; ⑥discovery of modern hydrothermal ore-forming processes in oceans and ⑦unreversibility and rhythm in metallogenic evolution etc.. In order to meet the demands of sustainable development of human society in the 21st century, the mineral deposit geology shows two new trends: ①globalization and ②unity of ore exploitation and environmental protection. Nowadays mineral deposit geology is facing three main research fields: ①the formulation of new ore-forming theories; ②the study and exploration of new types of mineral resources and the formation of general mineral resources geology and ③ the performance of basic research on mineral deposits to satisfy the need for building a "green mining" industry system.