

现代成矿学导论

郑明华

重庆大学出版社

现代成矿学导论

郑 明 华

重庆大学出版社

内 容 简 介

近20年来,古典矿床学受到了严重挑战,现代成矿理论应运而生。本书根据国内外最新资料,就现代成矿理论的建立和发展,花岗岩的形成、演化及与成矿的关系,多源成矿与复成矿床,沉积矿床和层控矿床的定位机制以及变质成矿作用等重大问题进行了科学的阐述和论证。此外,还介绍了世界矿产资源利用的历史和现状。

本书是为地质类有关专业研究生、本科生和地质技术人员培训班而写的。

现代成矿学导论

郑 明 华

责任编辑 卢奇勋 谢晋洋

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆大学出版社印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 21.5 字数: 537千 插图: 1
1988年10月第 1 版 1988年10月第 1 次印刷

印数: 1—3200

标准书号: ISBN7-5324-0048-2 定价: 4.25元

P·3

前 言

当前，包括矿床学在内的自然科学，出现了一个前所未有的新局面。学科高度分化又高度综合，新事实层出不穷，积累的资料浩如烟海，而知识更新的周期则日益缩短。

鉴于此形势，我国地质部门十分注意对广大地质工作者的知识更新。自1980年以来，作者除指导研究生外，还应邀在地质矿产部、冶金工业部、中国有色金属工业总公司等系统主办的各类培训班上，对矿床学的发展现状和趋向，以及现代成矿理论的若干主要问题进行了系统介绍。

近20年来，矿床学的发展进入了一个新的繁荣时期，古典矿床学的学科范畴和传统观念受到了严重挑战，广大矿床地质工作者对知识更新和知识面扩大的兴趣越来越浓。

应各方面的需要，作者把历年来的讲授材料作必要的整理后写成本书。囿于作者的水平 and 掌握最新资料的不足，书中不当之处必不会少。加之篇幅所限，对某些问题的论述难免原意未尽。此外，由于种种原因，从写成至付印，旷日持久，在知识剧增的今天，书中某些资料可能会显得老了一些。

然而，人们在从事科学研究和实际工作中，总离不开借鉴前人的研究成果，而文献资料则是人类精神财富的宝库。人们都不会否认，从事现代的科学研究和实际工作对资料的依赖性更大了，因而，尽管本书可能存在这样或那样的缺点，作者仍愿将这些素材和一孔之见奉献给从事对口工作的朋友们。

最后，衷心欢迎广大读者不吝赐教。

成都地质学院 郑明华

1987年2月于成都

11/49/08 05

目 录

第一章 矿产资源的利用和研究	(1)
第一节 矿产资源的利用概况	(1)
第二节 新成矿理论的建立	(7)
一、火山成矿作用作为新的成矿理论已被广泛接受	(7)
二、外生——沉积成矿意义的重新认识与某些沉积成矿概念的突破	(9)
三、成矿多源论的提出与发展	(10)
四、层控矿床概念的建立及其意义	(11)
五、关于叠加成矿与改造成矿	(12)
六、矿床系列概念的提出	(12)
七、全球构造环境与成矿的关系的研究	(13)
八、矿化集中区概念的提出	(15)
第三节 新方法和新技术在研究矿床方面的成功应用	(16)
一、成矿模式的建立和应用	(17)
二、深部地质环境特征的研究	(18)
三、航天和遥感技术的应用	(19)
四、同位素地质在矿床研究中的应用	(21)
五、数学理论和电子计算机的应用	(22)
六、矿物气液包裹体的研究及应用	(24)
七、莫斯鲍尔 (Mossbauer) 效应的应用	(29)
八、电波分光学和吸收光谱的应用	(29)
九、中子活化分析和 X-射线荧光光谱分析	(30)
十、电子显微镜、探针及其他显微分析的发展和应用	(30)
十一、成岩成矿实验	(31)
十二、热力学的应用	(37)
第二章 多源成矿与复成矿床	(40)
第一节 多源成矿论概述	(40)
一、成矿理论发展历史的简单回顾	(40)
二、成矿物质多来源概念的提出	(41)
三、成矿物质的可能来源	(45)
第二节 复成矿床 (多成因矿床) 的成矿机制	(60)
一、问题的提出	(60)
二、矿床形成的长期性和复杂性	(60)
三、复成矿床的成矿机制	(62)
第三章 花岗岩的形成、演化及与成矿的关系	(70)

第一节 花岗岩的若干基本问题	(70)
一、花岗岩成因争论的历史回顾	(70)
二、花岗岩的类型	(78)
三、花岗岩的定位方式和上升机制	(81)
四、花岗岩类的地球化学特征及其含矿性	(84)
第二节 花岗岩的演化及与成矿作用关系	(87)
一、花岗岩的演化	(87)
二、花岗岩的成矿作用	(91)
三、与花岗岩有关的矿床类型	(98)
第四章 沉积矿床进展	(107)
第一节 研究沉积矿床的意义	(107)
一、沉积碳酸盐岩研究的进展	(108)
二、浊流沉积和浊积岩的研究	(109)
三、沉积层中自生矿物的形成	(110)
四、沉积矿床有机地球化学的研究	(111)
五、陆源碎屑岩的研究	(112)
六、某些特征沉积物的出现与地史演化的关系	(113)
七、海洋资源的开发与利用	(114)
八、某些化学沉积矿床形成概念的突破	(116)
九、沉积硫化物矿床的成矿机制	(117)
十、沉积岩相古地理和沉积建造的确定	(118)
十一、风暴流和风暴岩概念的提出	(119)
第二节 沉积矿床的形成过程和形成条件	(120)
一、沉积作用过程	(120)
二、沉积矿床的形成条件	(134)
三、沉积矿床的基本特点	(142)
第三节 某些金属的沉积成矿机制	(143)
一、概述	(143)
二、金属氧化物沉积矿床的成矿机制	(145)
三、金属硫化物沉积矿床的成矿机制	(158)
四、火山-沉积矿床的成矿机制	(175)
第五章 层控矿床的定位机制	(192)
第一节 层控矿床理论的提出与发展	(192)
第二节 层控矿床的概念及基本特点	(195)
一、层控矿床的概念	(195)
二、层控矿床的基本特征	(197)
第三节 矿源层及其在成矿作用中的意义	(203)
一、下寒武统黑色岩系	(205)
二、泥盆系碳酸盐岩系	(209)
三、寒武-震旦系碎屑岩系	(213)

第四节 层控矿床形成的基本作用和环境	(214)
一、地下水的溶滤作用	(214)
二、“萨布哈”成矿作用	(221)
三、热卤水的成矿作用	(225)
四、变质溶液和超变质溶液的成矿作用	(236)
五、岩浆气液的作用与叠加	(240)
六、生物礁环境与成矿作用	(241)
七、岩溶环境与成矿的关系	(243)
第五节 层控矿床的基本类型及特点	(246)
一、地下(卤)水溶滤型层控矿床	(247)
二、“萨布哈”型层控矿床	(271)
三、变质和超变质热液型层控矿床	(274)
四、岩浆气液叠生型层控矿床	(283)
第六章 变质成矿作用	(287)
第一节 变质成矿作用理论的基本情况	(287)
一、概述	(287)
二、地质时期中岩石组成的变化及成矿期的划分	(289)
三、变质岩原岩建造的恢复	(290)
四、前寒武纪时期地壳的演化及指示地壳演化的特殊岩石类型和建造	(296)
第二节 变质成矿作用的物理化学	(298)
一、变质成矿作用的基本因素	(298)
二、变质反应	(305)
三、相律在变质反应中的应用	(308)
四、变质级	(309)
五、变质相和变质相系	(311)
第三节 变质成矿作用类型及主要含矿变质建造	(314)
一、变质成矿作用类型	(314)
二、变质成矿作用中元素的活动及受变质地体的变化	(319)
三、主要的含矿变质建造	(321)
主要参考文献	(329)

第一章 矿产资源的利用和研究

近20年来,随着矿产资源的大量开发、资源勘查工作的深入、科学技术方法的发展以及成矿理论水平的提高,矿床学科正经历着一场深刻的变革。

当代经济的发展给矿床地质工作者提出的最重要的科学技术问题是:如何迅速而有效地查明那些在地表难以发现的“埋藏矿床”以及如何节约、有效和持续地利用有限的矿产资源。美国斯坦福大学的C·帕克曾指出,任何一个国家的经济和政治特点,都不能与该国的矿产资源情况脱离开来。他还指出,在处理战略、社会、经济和政治等问题时,极其重要的一个因素是要能持续得到需要的能源和矿产的资源量。因为在制定战略、社会、经济和政治等的政策时,需要充分利用这些评价资料。而矿产资源及其相应的工业与一般的工厂、牧场和商业完全不同。它至少在三个方面与其他工业不同:第一,矿床的分布无论在地理上或地质上都是不均匀的,而且其可得性是有限的。第二,普查、勘探和开发工作带有很大的冒险性,并需大量投资。第三,主要的矿产是会被开采殆尽的。由此看来,制定全面的能源和矿产原料政策的时刻已经到来。

自工业革命以来,人类对矿物资源的依赖程度日益明显,尤其是工业化国家对矿产资源需求量的增长速度是惊人的。据斯坦福大学P. Ehrlick的资料,西方国家按人口平均的资源需要量和对环境的影响,相当于发展中国家的50倍。毫无疑问,大多数发展中国家在今后的工业化过程中,也必然会扩大对矿产资源的需求,其总量将是十分惊人的。

第一节 矿产资源的利用概况

从历史上看,矿产利用往往成为古老文明的重要标志之一。但是,从工业发展和矿物原料利用的态势来看,真正达到最高峰是在进入20世纪以后。据不完全统计,在18世纪以前,人类只能大体利用25种化学元素(包括化合物),进入18世纪时,能利用的化学元素也仅29种,但到19世纪后,由于工业革命对元素的利用急剧增加,于是发展到61种,进入20世纪以后,已利用的化学元素猛增至近百种。此外,可利用的矿产多达150种。与此同时,数百种元素的同位素也已得到发掘和利用。

毫无疑问,元素的利用史与元素的发现史不可分割。日本学者大町北一郎认为,元素被利用的历史已接近尾声。有些元素在早期被广泛应用,有些元素在第二次世界大战后,由于电子工业的发展而被放弃,与此同时,稀土和稀有元素又异军突起,为许多工业部门所广泛应用。工业利用元素的历史如表1-1所示。

众所周知,矿业在任何一个国家的经济生活中都具有重大意义,近百年来,各种矿产不仅勘测储量急剧增长,而且产量也大幅度地增加。Г. А. 米尔林在《2000年前后的矿产资源》一文中估计,包括19世纪在内的人类利用铁的漫长历史在内,共开采了约40亿吨铁矿石,但只占世界铁矿石总开采量的13%,而仅仅在1901—1980年的80年中,就开采和生产了240亿吨铁矿石,占总开采量的87%多。煤在17世纪到1900年开采的只占10%,而在20世纪

表1-1 部分元素的利用历史

时 代	被 利 用 元 素 的 名 称
公 元 前	Cu, C, Au, Pb, Ag, Sn, Zn
公元前—1830年	Fe, Ca, Na, K
1839—1840年	Pt
1840—1850年	Ba
1850—1870年	Mn, Hg
1870—1880年	Ni, Sr
1880—1890年	Al, Mg
1890—1900年	B, Si, W
1900—1910年	Cd, Co, Th, Ti, V
1910—1920年	Sb, As, Mo, Ra
1920—1930年	Be, Cr, Te
1930—1940年	Bi, In, Li, Nb, Se, Ru, Ir, Os
1940—1950年	Ga, Ge, Ta, Tl, U, Pu
1950—1960年	Cs, Hf, Re, Y, Zr, Ce, La
1960—1970年	Pd, Rh, Ru, Pr, Nd, Sm, Eu, Er, Tb, Dy, Rb, Sc, Nb, Yb, Tm, Gd

开采的就占90%。石油在20世纪开采的竟达99.5%。其余矿产的开采情况也具类似特点。

由上可见,在到1900年为止的漫长历史时期里,矿产的总开采量是较低的,绝大多数(占85—95%以上)是在20世纪头80年内开采的。从表1-2列出的20世纪最主要的十几种矿物原料开采量增长数据可以看出,矿产开采量是以异常迅速的速度在发展着。这种持续发展的态势是与工业发展相呼应的。特别是自1961年起至1980年止的这段时间,矿物原料的消费

表1-2 20世纪最重要的十几种矿物原料的世界开采量(据Г.А.米尔林)

矿 物 原 料	以 20 年 为 阶 段				1901~1980 年 总 计
	1901~1920	1921~1940	1941~1960	1961~1980	
煤(十亿吨)	$\frac{21.8}{15.4}$	$\frac{25.7}{18.2}$	$\frac{35.5}{25.1}$	$\frac{58.5}{41.3}$	$\frac{141.5}{100}$
石油(十亿吨)	$\frac{1.1}{1.8}$	$\frac{3.4}{5.6}$	$\frac{11.7}{19.3}$	$\frac{44.5}{73.3}$	$\frac{60.7}{100}$
天然气(万亿米 ³)	$\frac{0.3}{1.1}$	$\frac{1.0}{3.7}$	$\frac{4.8}{17.7}$	$\frac{21.0}{77.5}$	$\frac{27.1}{100}$
铀(千吨U ₃ O ₈)	$\frac{—}{—}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{144}{22.5}$	$\frac{497}{77.5}$	$\frac{641}{100}$
铁矿石(十亿吨)	$\frac{2.9}{10.9}$	$\frac{3.3}{12.4}$	$\frac{5.9}{22.2}$	$\frac{14.5}{54.5}$	$\frac{26.6}{100}$
铝土矿(百万吨)	$\frac{7.6}{0.6}$	$\frac{29.9}{2.5}$	$\frac{207}{17.2}$	$\frac{956}{79.7}$	$\frac{1200.5}{100}$
铜(百万吨)	$\frac{17.5}{8.9}$	$\frac{28.5}{14.6}$	$\frac{49.2}{25.2}$	$\frac{100.3}{51.3}$	$\frac{195.5}{100}$

续表

锌(百万吨)	$\frac{14.1}{9.0}$	$\frac{25.1}{16.1}$	$\frac{38.8}{24.9}$	$\frac{78.0}{50.0}$	$\frac{156}{100}$
镍(百万吨)	$\frac{0.4}{3.0}$	$\frac{1.3}{9.9}$	$\frac{3.1}{23.5}$	$\frac{8.4}{63.6}$	$\frac{13.2}{100}$
钨(千吨WO ₃)	$\frac{39}{4.3}$	$\frac{128}{14.1}$	$\frac{223}{24.6}$	$\frac{520}{57.0}$	$\frac{910}{100}$
钼(千吨)	$\frac{3.6}{0.2}$	$\frac{98}{5.4}$	$\frac{443.4}{24.5}$	$\frac{1267}{69.9}$	$\frac{1812}{100}$
金(千吨)	$\frac{12.1}{18.2}$	$\frac{14.6}{22.0}$	$\frac{17.1}{25.8}$	$\frac{22.5}{34.0}$	$\frac{66.3}{100}$
金刚石(百万克拉)	$\frac{86}{7.6}$	$\frac{136.5}{12.1}$	$\frac{242.5}{21.6}$	$\frac{659}{58.7}$	$\frac{1124}{100}$
石棉(百万吨)	$\frac{1.8}{2.5}$	$\frac{5.7}{8.1}$	$\frac{19.2}{27.1}$	$\frac{44.1}{62.3}$	$\frac{70.8}{100}$
钾盐(百万吨K ₂ O)	$\frac{10.6}{3.1}$	$\frac{35.7}{10.5}$	$\frac{74.3}{21.9}$	$\frac{219}{64.5}$	$\frac{339.6}{100}$
磷酸盐矿石(百万吨)	$\frac{80}{4.2}$	$\frac{172.5}{9.2}$	$\frac{377.5}{20.1}$	$\frac{1250}{66.5}$	$\frac{1880}{100}$

- 分母表示该种矿物原料在20世纪头80年总开采量中所占的百分比。煤、石油、天然气和铁矿石引用的为世界开采量，其余为苏联和东欧国家除外的数据。

量和开采量不仅同时保持了成倍增长的势头，而且还为这一时期兴起的一些崭新工业部门，如电子工业、核动力工业、航天技术的需要提供了充分的原料。从表1-2中还可看出，这段时期开采的煤，占20世纪以来煤的总开采量的40%以上，铁矿石占近55%，石油占73%以上，天然气占77%以上，钾盐占67%，磷块岩占72%，铝土矿占80%等等。

特别要指出的是，自50年代以来，由于科学技术和冶金、化工、油气、建材、国防尖端和现代农业的发展，非金属矿产在国民经济建设中的开发速度超过了金属矿产。根据有关资料计算，近30年来，国外非金属矿产年增长率为6%，而金属矿产不到5%，非金属原料消费量平均年增长率为5.6%，而金属原料仅1.6%。而且在一般发达的国家里，非金属矿产的产值为金属矿产产值的两倍（美国为三倍多）。在1976年至1984年的8年中，我国平均增长率也已达到10%。目前，大理石材全世界都处于供不应求的境地，在20多个生产国中，每年以15—20%的速度增长着，其中意大利的装饰材料年出口额近10亿美元。我国目前年产大理石荒料11万吨，板材40—43.7万平方米，仅为意大利的1/25，为西班牙的1/5。我国的非金属矿产资源前景是令人鼓舞的。已获储量的约80余种，产地4500余处，其中硫铁矿、石膏、萤石、菱镁矿、石棉、磷矿、砷矿、明矾石、盐矿等储量均居世界前列，滑石、高岭土、石墨、重晶石、硅藻土、膨润土、花岗岩、大理岩等的资源也蕴藏丰富。无疑，上述矿产资源优势，在不久的将来必将转化为产业和产品优势。

世界矿产资源总的发展趋势的另一一方面是品种扩大、矿产类型日益增多、综合利用程度提高以及对矿石的品位要求趋于降低。

近二、三十年来，由于不断发现新的矿床类型，从而扩大了找矿和矿产资源利用的领域。例如，近年来在火山沉积岩层中找到了新型的铀、石油和铜-铍矿床。在古老的辉钼矿床中，发现钼的含量可高达3 g/吨，具有工业应用价值。火成碳酸岩中矿体的陆续发现和矿种的扩大，打破了前寒武纪无油气的禁区。在16亿年前的地层中发现了工业油流和气流，而且储油地层和岩石的种类也有新的突破，发现了铂族金属除与基性杂岩体有关外，在许多很不相同的岩石中均有不同程度的聚集。发现了分散元素（如Ga、Ge）的独立矿床和独立矿物，在盐湖、褐煤层和火山凝灰岩中发现了钨矿床，在碳酸盐层中发现了方解石脉型矿床（水晶、金、冰洲石等）。铁矿浆的发现、“多金属斑岩系统”的发现——除斑岩铜钼矿床有重大发现外，还发现了斑岩型金矿床、银矿床、锡矿床、钨矿床、铀矿床等。破火山口中锂皂石矿床的发现以及海底富矿泥的发现等。这就从另一个侧面强有力地说明，近20年来的找矿和勘探事业取得的进展是巨大的。

还应指出，大型矿床和特大型矿床的发现对改善一个国家的资源面貌具有重要意义。所以，世界上一些巨型矿床的发现，往往成为轰动地质界的重大事件。自60年代以来，世界各地陆续发现了一批大型的斑岩铜矿床，其中以美洲西部斑岩铜矿带的发现最为突出。从北美到南美智利的狭长地带中，就发现了30余个大型矿床，矿石储量达800多亿吨（含Cu0.5—1.0%）。其中以智利的楚基卡马塔和特尼恩特最为著名，前者矿石量超过100亿吨，后者矿石量近80亿吨。据估计，由于斑岩铜矿的重大发现，使资本主义国家铜的储量和产量的70%以上来自此类矿床中。密苏里—田纳西铅锌矿带的发现是又一个重大的地质事件，该矿带位于密西西比已开采的密苏里老矿区的南面地下300~400m深处，Pb和Zn的矿石储量达10亿吨之多。由于该矿带的发现，使美国的Pb产量超过澳大利亚而跃居世界第一位。到了70年代，世界各地还发现了一系列巨型的铀矿床，其中最重要的是澳大利亚的东阿里格特矿带和加拿大的阿萨巴斯卡矿带。前者远景储量（ U_3O_8 ）达150~200万吨，后者远景储量（ U_3O_8 ）达80万吨，**它们均属于不整合-脉型的新型矿床。由于此类矿床提供的铀储量约占世界铀的总储量的25%，因而是公认的一个重要成果。**美国斯提沃特层状铂族矿床的发现，被认为是70年代地质工作的又一重大成就。矿层走向延伸达39km、平均厚2.1m、品位（Pt+Pd）平均达22.3g/t。由于这一矿床的发现，使美国由无铂国跃为富铂的国家。澳大利亚在哈默斯利地区发现200多亿吨的特富铁矿床，加拿大在拉布拉多地区也发现了200多亿吨的铁矿储量，从而使这两个国家变为铁矿石的出口国。此外，大油气田的发现也极其令人瞩目。如中东和北非的一系列大油田的发现，特别是利比亚大油田的发现最负盛名。由于该油田的发现，使利比亚在短短10年内石油的储量净增了5—6倍。而北海油气田的发现，则使英国等国的油气供应紧张局面得到了很大程度的缓和。

现在，由于技术的进步，综合开发和利用不仅必要而且可能。比如，大部分矿床本身就是由若干种矿物和不同元素的化合物组成的多组分地质体。只要采用相应的工艺方法，就能在利用主要矿产的同时，从矿石中提取伴生的然而又是很有价值的组份。而且综合开发和利用的实施，还可使金属矿床和非金属矿床的界线有失去意义的可能。例如，人们可从某些砂

卡岩多金属矿床的开发中综合利用石棉、冰晶石、硼砂，在磷块岩矿床中提取稀土金属等。

毋庸讳言，当前在综合开发和利用方面还存在许多问题，特别是一些中小型矿山浪费资源的现象依然严重。因此，只有大力推动采矿工业的技术进步，冶炼水平的提高以及大大提高人们对于综合利用矿产资源的重要意义的认识，才能克服那些不利因素的影响。

矿产资源是有限的，因此，它必将随着时间的流逝被逐渐消耗掉而得不到补充。所以，矿产资源的有限性问题今后将显得特别尖锐。按照目前这样的开采速度发展下去，矿产资源储量是否足以保证如此之大的开采量和增长率呢？显然，提出这类问题并不是没有道理的。据欧美等国某些研究人员预测，目前已知的矿产储量，大部分将在2000年前后被开采殆尽。这是由于矿产消费量和开采量的“爆炸性”增长导致人们惊呼矿产危机的依据。不过，美国矿

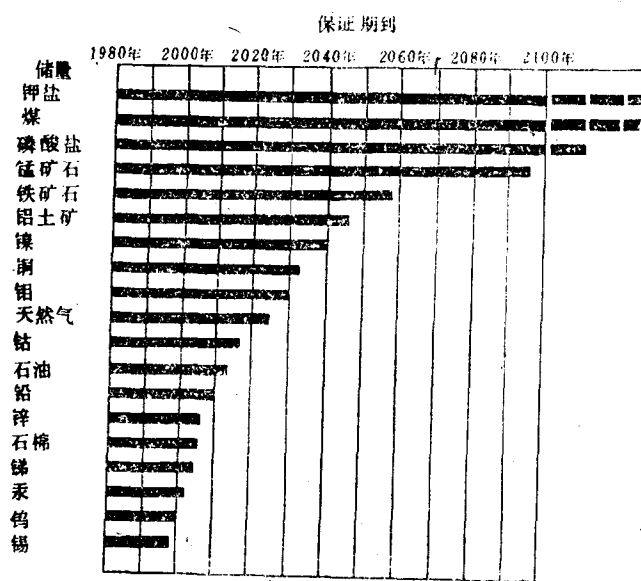


图 1-1 按1980年资本主义国家和发展中国家开采量水平推测的证实储量和推测储量

已由1970年的1000吨下降到1980年的670吨并在继续下降。而且，许多矿产的储量寿命已屈指可数（图 1-1）。

不论对矿产资源的估计持乐观态度或悲观态度，矿产资源日益减少的总趋势是一个公认的事实。由于比较易于开采的和最有效的那部分储量的减少而造成的经济因素，必将导致矿产勘探、开采、选矿和加工的复杂性和成本不断提高。而采矿的复杂性和成本的不断提高又必将导致矿产价格的大幅度上涨。仅据最近10年（1970年到1980年）的统计，Fe、Cu、Ni的世界价格已上涨了一倍，Cr、Zn、W、Mn和Al的价格已上涨了1.5—2倍，Sn和Mo的价格上涨了4—4.5倍，磷酸盐矿石的价格上涨了2.6倍，钾盐价格上涨了6.3倍，天然气上涨9.4倍，而石油的价格则上涨近14倍。

近年来，在开采矿石中已出现金属和其它有用组份含量不断降低的问题。如Cu的平均含量已从0.7—0.8%降到0.6—0.5%。但是，含量每降低0.1%都会带来沉重的经济负担。所以，寻找富矿石仍然是迫切的任务。

山局对20世纪剩下的时期世界上对矿产资源需要量达到何种程度和规模所作的预测却稍乐观些。他们认为，从总的方面看，到2000年时，如果世界上社会和经济形势无大的变化，矿产资源的供给状况是不会出现太大问题。但就一些具体矿床和个别区域而言，在一定深度内已经发现和探明的矿产储量面临枯竭却是完全可能的。例如，欧洲的许多老矿山的上部矿床已全被采空。Pb、Zn、Cu和其他金属矿床的开采矿井深度已经超过1500m，南非金矿床的矿井深度已达到3000m以上，Au的开采量

还有一个十分值得注意的问题是当今世界对资源的浪费十分惊人。据统计,全世界煤的年损失量达7~8亿吨,铁矿石的损失量超过5000万吨,有色金属和稀有金属的损失量也达成千上万吨。目前,石油的采收率还不到勘探的地质储量的40—50%,有一半的石油储量或更多仍留在地层中。还有很多珍贵的金属和矿物留在废石堆中、选矿的尾矿里和冶金生产的废料中。其中有价值的组份的含量往往比许多正在开采的贫矿石中的含量高得多。

有鉴于此,一些国家对过去开发中被丢弃的有用堆积物,如老采区的表外矿、残矿、尾矿、废料和废矿石堆等重新加以利用或作为潜在资源进行研究。人们把这类重新被利用或再次可供利用的矿物堆积体,称为“矿产的补充资源”。一些国家还对城市中的固体废弃物(垃圾)进行再生。因为垃圾中存在着大量金属和非金属产品,为了重新利用这部分矿产资源,近年来国外兴起了所谓“第二次矿产原料工业”,即开发矿产补充资源的工业。美国环境保护局在给国会提交的《垃圾白皮书》中认为,这不仅能节约资源,而且还有保护环境的作用。据该局计算,从城市垃圾中每天可产出的燃料相当于40—50万桶石油。从垃圾中回收的物资,钢铁占美国年消费量的7%、Al占8%、Sn占20%等。目前,世界上拥有石油和天然气矿床的国家,都在大力研制并且实行能将石油采收率提高百分之几的各种技术措施,并为此付出了极高的代价。由上可见,矿产补充资源的研究和利用,已成为各国广泛重视的大问题。

为了满足人类对矿产日益增多的需要,人们已注意到大陆架、大陆坡和洋底的巨大潜力。在大洋中,除生物资源外,矿产资源也是十分丰富的。例如,目前约占1/5左右的石油开采量来自海上油井。据美、法等国学者估计,大陆架和洋底的可采石油储量为900—1500亿吨。海底金属矿床也具有很大的实际意义。如印度尼西亚、泰国、马来西亚的滨海砂矿是Sn的最大供应源地(占资本主义国家Sn储量的3/4);澳大利亚、巴西、印度、墨西哥、塞拉利昂、挪威、美国等国的滨海地区和其他地区的钛、锆砂矿也已投入开采。至于洋底的铁锰结核(含有Cu、Ni、Co及其他元素)远景更为可观。而海洋水本身就是许多元素和矿物的源泉,如目前世界食盐消费量的1/3左右,Mg消费量的1/5左右,都取自海水。

由于矿产在地壳中分布的绝对不均匀性,因此,世界上几乎没有一个国家能够完全依靠本国的资源以满足经济建设的需要。美国拥有大量的品种较齐全的矿产资源,但工业需要的许多最重要的矿物原料几乎全部靠进口。美国近年来需要的石油和石油产品约有45—48%都是进口的。

鉴于全球的工业生产在继续增长,对矿产资源的需要无疑也将同步增长。据一些研究者预测,到2000年前后,全世界对最重要的矿物原料的需要量,将比20世纪70年代末和80年代初增长约0.5—1倍。

假设全世界以20世纪80年代的水平进行开采,到2000年时仍保持不变,那么到2000年时,将从地下采出740亿吨煤、600亿吨石油、30万亿立方米的天然气和180亿吨的铁矿石。即使以此速度进行开发,到20世纪末,全世界开采的矿产量也会大大超过过去20年中数字本来就很大的开采量。

虽然如此,但据世界大多数矿产的探明储量和推测储量估算,未来工业发展所需要矿产资源其保证程度仍会是相当高的。对于幅员广大的国家来说,有利条件当然更多。因为所占的地壳面积大,地质构造和岩石建造复杂多样,有可能发现新的、大型的矿床。

在解决发展经济的矿产资源保证问题时,起最重要作用的是地质勘探工作和开采工业的技术进步,其中包括研制和应用崭新的、高效的地质普查、勘探、采矿、选矿和矿物原料加工方法等,才能大大克服许多不利因素的影响。就现代探测地壳深部层位的新方法、新技术而言,加大探矿和采矿深度是可能的,虽然会增加成本,但却是增加矿产资源的巨大潜力之一。

利用现代物理-化学的成就进行人工合成,也是弥补某些矿产不足的一大潜力。目前,人造金刚石、红宝石、压电石英、云母等,均已能进行大规模生产了。而且,还可利用各种合成结构材料代替部分钢、Al、Cu及其他一些短缺金属。许多国家从煤、油页岩和沥青岩中提取人造液体燃料的研究,也取得令人鼓舞的成果。

第二节 新成矿理论的建立

作为研究成矿作用的最主要学科——矿床学在指导找矿和勘探工作中取得了巨大的成功。不过,既然矿床学研究的是那些人类从未经历过的成矿地质过程,因此,在估价近代矿床理论的成就时,需要有一个正确的态度。对于它的成就,我们只能把它看作是对成矿机理认识的又一次深化,但绝非最后的、终极的真理。同样的道理,当我们谈论其不足时,也绝不能以能否直接指导找矿作为理论真伪的唯一尺度,否则就易犯实用主义的错误,自觉或不自觉地忽视了理论对工作的指导作用。

近二三十年来,矿床学中传统的、占统治地位的岩浆-热液成矿论受到了很大的冲击。唯玄武岩浆成矿理论已被多源成矿理论所代替,并以此为契机,提出了一系列与传统概念相对立的新的成矿概念。

一、火山成矿作用作为新的成矿理论已被广泛接受

长期以来,一些岩石学者否认有超基性岩浆的存在,尽管地壳中广泛分布着超基性熔岩、橄榄岩和金伯利岩熔岩。但自从发现了“麦美奇岩”后,使否认橄榄岩岩浆存在的情况几乎翻过来了。具有枕状构造和冷凝结构的科马提岩的发现,更进一步确凿地证明了超基性岩浆的存在是一个无庸怀疑的地质事实。现在,人们已把科马提岩视为太古代绿岩带下部的标志层。由于太古代绿岩带赋存有重要的矿产(Au、Fe、Cr、Ni、Co、Cu等),因此,科马提岩的发现其意义是极为重大的。长期以来,人们还否认有碳酸岩浆的存在,但自从1960年在坦桑尼亚发现活火山中喷出纯碳酸岩的熔岩流以后,怀疑论者消声匿迹了。

其实,火山作用是自然界最普遍的地质现象之一。在当今地球上,无论是陆地或海洋中都仍可看到众多的活动火山在喷溢出大量的熔岩、凝灰岩、气液和矿质。而且喷出规模相当壮观。若在地壳形成的早期,那火山作用的规模和数量更比今日大得多和普遍得多,因而伴随成矿作用的规模和数量也非近代火山成矿可比!

火山喷发时能携带大量矿质的现象早为人知,一些活火山还受到火山学家们的长期监测,他们所提供的数据是可信的。例如,1983年3月28日,埃特纳火山重新爆发,数天内不仅喷出了大量的熔岩,而且还喷出Au48kg、Ag118kg以及数量极大的其他金属和非金属。据位于火山附近的卡塔尼亚大学火山学系的研究人员和一些法国科学家最近利用电子计算机对火山喷发的烟气所作分析得出的数据,烟气中含有硫磺、Cl、K、Na、Ca、Br、Al、Au、

Ag等多种金属和元素。另据估计,该火山每天喷出的烟气中含硫磺达410吨,Se630kg、Mn290kg、Au2.4kg、Ag9.0kg等。

火山活动,除可能形成矿床外,由于火山爆发时能量极大,因此,还常常引起地震、喷火、造山、断陷、海啸、暴雨以及山洪爆发等。如美国圣海伦斯火山,在休眠123年之后,于1980年又重新爆发。据报导,仅该年5月18日喷出的熔岩和火山灰即多达 10^8m^3 ,并使2903m高的火山崩塌了200m,火山喷发时的冲击波穿透云层直上高空,火山灰随气流扩散到4000km以外,距火山口达800km处,落下的火山灰厚度达1.3cm。同月25日爆发时喷出的火山灰和火山烟柱竟高达12000m;6月12日爆发的蘑菇状黑云,高达18.52km。又如意大利埃特纳火山,第三纪时由海底升出海面,1969年发生爆发时,喷出的火山碎屑物形成高达137.25m的双锥火山。喷出的熔岩淹没了14个城镇之后,越过高18.3m的卡塔尼亚城墙(专为堵截熔岩流而建),似巨型瀑布下泻一举埋没了该城(流速48.8m/h)。据报导,熔岩温度极高,经8年之后,人的手尚不能伸进裂隙。火山爆发还可能使气候发生突变,甚至导致冰期的到来和生物的灭绝。

火山作用,一般可分为陆地火山和海底火山两种不同的环境。其中海底火山作用对成矿具有更为重要的意义。现已查明,海底火山作用可形成一系列矿床,而且依距火山口的远近不同,往往还会出现特有的性质。这类矿床一般都规模较大,多呈层状和似层状矿体产出,如黄铁矿型矿床、黑矿型矿床、多金属硫化物矿床、铁和锰矿床等。至于陆地火山活动成矿的形式,一般认为多与次火山岩有关,如斑岩型矿床等。至于直接喷出地表成矿的,最重要的发现莫过于60年代在智利拉科北部大安第斯山埃耳-拉科火山杂岩(第四纪安山岩一流纹英安岩)中五个很大的磁铁矿熔体(矿浆凝结体),据此,人们第一次肯定了有“矿浆”的存在。该矿体的品位极高,储量多达10亿吨,由磁铁矿、赤铁矿、假象赤铁矿和少量磷灰石、阳起石组成,其外貌与多孔玄武岩无异。

鉴于火山作用的成矿能力以及火山成矿的证据日益增多,从而促使人们去重新探讨一些已有成因“定论”的矿床。例如,已列入教科书中当作范例的瑞典基鲁纳磁铁矿-磷灰石矿床(视为晚期岩浆矿床)、黄铁矿型矿床(归入中温热液矿床)、斑岩铜-钼矿床(中温热液矿床)等,经近年来的研究证明,它们都是火山活动或次火山活动的产物。

火山成矿及其分布,通常受火山机构的控制,火山机构系指在一定阶段内,由同一火山作用形成的、以火山通道为中心的各种产物的总和。它包括火山口、火山锥、火山通道、寄生火山、放射状及环状岩墙、与火山通道有关的次火山岩、火山侵入杂岩等。它们在空间上以火山通道为核心作规律性分布。在时间上则基本上属同一火山活动的产物。在产状上既有喷出成层者,也见有侵入切层者。在岩性上表现为熔岩状、角砾状、浅成-超浅成的块状岩和隐爆角砾岩等。

从含矿的火山-侵入杂岩和含矿火山杂岩的一般特征可知,这些杂岩可以是任何一种岩浆生成物相。如陆上一近地表的或水下的(喷溢-喷发的、爆炸的、破火山口的),近地表次火山的(火山穹丘的、近破火山口的、岩床-岩盖的、岩墙的等),深成火山的(深成火山管道的、具火成角砾岩之爆发筒的)。与陆上近地表相有关的,有自然S、B、Sb、Sn、As、雄黄等含矿建造;与次火山相有关的,有Au、Ag、Sn、辉锑矿-黑钨矿、Be-硅铍石、Mo-U等建造,与其相应的还有热液变质相;与深成火山相和其相应的一些变质类型有关的有含铜斑岩、含铜-电气石建造、Mo、稀有金属硫酸盐岩、安加拉-伊里姆型磁铁矿建造等。

关于火山成矿作用的矿物质来源问题,人们根据各期火山杂岩的岩石地球化学(共生组合、混入物、元素的同位素组成)、矿化作用特征及其与基底岩石的相互关系,结合古水文地质资料,并依据对作用过程的化学变化以及矿物共生组合的迁移和沉积形式所进行的理论和实验研究表明,成矿物质的来源是各不相同的,主要来源有:(1)上地幔的深成岩浆;(2)硅铝层岩浆源上部或边缘部分;(3)富含由深成溶液带来的基底岩石中的矿质;(4)在地壳上部热液作用和成矿作用发育区富含矿质的岩石;(5)地下水含矿溶液。

由于火山成矿的可能性已被人们认识。因而在火山岩地区进行找矿就成为顺理成章的事了,且在实践中也已取得了一系列的成功。例如,南非最富的金刚石矿(芬什矿山),就是一名叫芬什姆的地质人员靠触类旁通的火山成矿知识在寻找其他矿床时顺便发现的。加拿大的块状硫化物矿床与粗粒长英质火山碎屑岩共生的关系异常明显,于是人们在找矿时可以此种岩石作为可靠的找矿标志。西班牙块状硫化物矿带是世界上最巨大的成矿区之一,开采历史悠久。该矿带一直被认为是热液成因与侵入体有关。在此观点的指导下,从1945年至1955年间投入了大量的钻探工作,然而收效甚微。1957年起又采用多种物探,因未掌握成矿的本质条件,又告失败。随后进行的航空电、磁法仍未取得成效。但是,自从认识到该矿带乃火山喷气沉积形成的,容矿地层是火山凝灰岩,硫化物与火山凝灰岩系为同生关系,并与其中的一层火山凝灰岩有关。以后根据这一新认识,从新确定了找矿准则,很快便在第三系巨厚的覆盖层下找到了新的矿体,储量多达5亿吨。

二、外生——沉积成矿意义的重新认识与某些沉积成矿概念的突破

实际资料表明,几乎所有的动力资源均与现代和古代的沉积形成带有关。建筑业、化学工业、黑色冶金工业所需原料几乎全部蕴藏于沉积矿床中。有色和稀有金属在沉积矿床中也占极大比重。可是,长期以来,不仅科学研究工作,就是在教学工作中也不重视沉积成矿作用和沉积矿床。由于有害的传统观念作祟,人们常常有意或无意地对沉积矿床抱有一定程度的歧视。

可是,由于沉积矿床成层分布、范围广、储量大、具有巨大远景,适于机械化和自动化开采,因此,在矿产资源需求急剧增长的今天,其重要性就更明显了。近年来,国际学术界广泛开展了对表生成矿的研究,如第六届、第七届国际沉积学会就召开过矿石成因讨论会。会上,都特别强调了沉积环境、成岩作用和微生物活动对元素聚积和成矿的重要影响,并对一些层状矿床展开了地球化学相、找矿的沉积学标志和准则的讨论。此外,还对前寒武纪以来地史上的沉积硫化物和层状硫化物矿床的分布和演化进行了系统的总结。

近年来,在沉积成矿理论方面,许多传统的沉积作用概念已有重大改变,取得的进步是很大的。例如,洋流上升成磷块岩矿床的理论,已取代了生物成因和简单的化学沉积理论。早期生油理论已为晚期生油为主的理论—热成熟理论所代替。后者认为,形成油、气的物质是干酪根(不溶于有机溶剂的有机物),干酪根转化为油、气,主要取决于温度、埋藏时间和压力。天然气多源概念已经建立,因为已经查明,形成和保存天然气的地质-热力条件要比石油广泛得多。天然气既可来自海相母岩,也可来自陆相母岩及含煤岩系,还可能有一部分是来自地球内部的非生物成因的气体。人们还注意到,某些沉积的金属矿床不只是在沉积盆地的边缘形成,而且在海盆内也存在有利于成矿的非补偿盆地。成矿物质不仅可来自大陆

的剥蚀区,而且也可来自海底火山和热泉。现代泥炭沼泽大多分布在北半球寒带和寒温带,世界泥炭资源95%以上集中在苏联、加拿大、美国、芬兰、瑞典等国,这些事实无疑是对成煤条件的传统认识的冲击,并为冰川与成煤作用的关系的研究作了有力的推动。值得注意的,还有关于盐类矿床的物质来源问题。许多资料表明,盐类的沉积顺序与海水蒸发试验结果并不总是一致。因此,盐类可能有深部来源,成盐盆地主要应是受深断裂或裂谷带控制的构造盆地等。

由于对外生-沉积成矿意义认识的提高,因而矿床学的研究领域已有了进一步的扩大,即从大陆区扩展到了海洋。

三、成矿多源论的提出与发展

当代矿床学的研究趋向是向全球、向地下深部、向宇宙、向海洋发展。在此形势下,成矿理论中最基本的问题,即成矿物质来源问题又被重新提出,并被认为是需要优先加以解决的问题。

自上一世纪末起,矿床学界即被岩浆-热液分异成矿论所主宰。分异学说的主旨思想是自然界中所有的矿床均分属于各类火成岩,而这些火成岩又是统一于玄武岩岩浆之中(图1-2)。这一成矿理论被人们称为“唯玄武岩岩浆成矿论”或“一源论”。

由于现代科学技术的飞速发展,也由于大量新的地质事实的发现,人们逐渐对这一理论的可靠性提出了怀疑。例如,花岗岩浆是由玄武岩浆分异而来或者具有独立的起源?凡矿床均与火成岩的存在有必然的联系或者与火成岩无关?热液的来源是唯一由岩浆分泌或者也可来自其他方面?诸如此类的关键性问题,依靠传统的认识显然是无法解决的。经过认真的探索,人们找到并提出了许多新的证据和看法。

大量的地质事实和实验表明,自然界确实有一部分矿床与玄武岩浆关系密切,但同时也查明了,大量的花岗岩的生成与玄武岩浆无关,而是由地壳硅铝层经重熔和再熔而成。而且自然界中相当一部分与花岗岩有关的矿床已被证明是非玄武岩浆

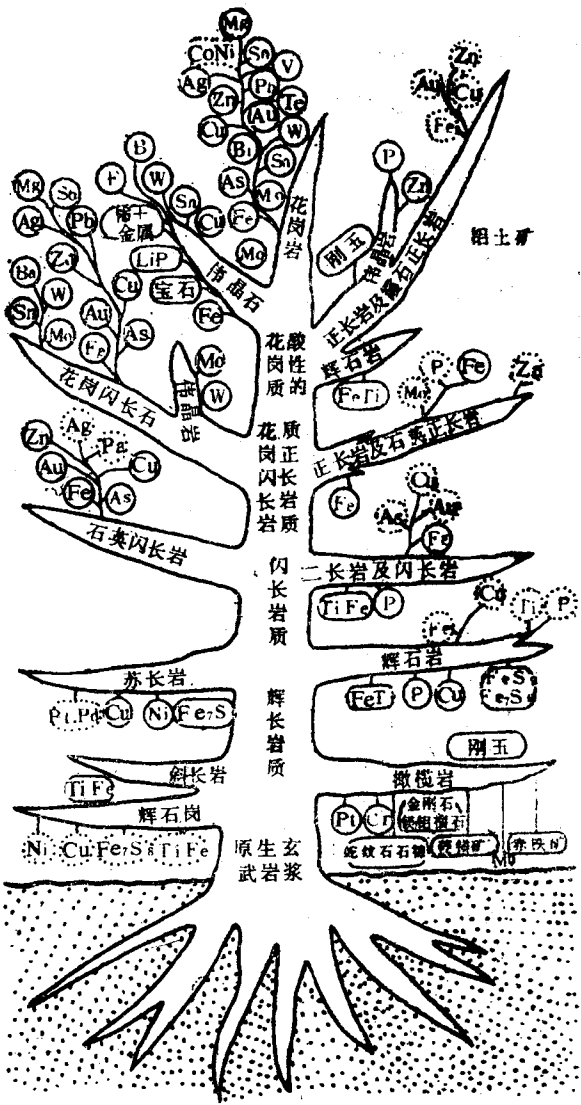


图 1-2 矿床与火成岩的关系 (据贝特曼)
向上分叉的元素形成于岩浆喷气矿床,下悬的是岩浆聚集;降落的是风化产物。实线圈表示主要共生矿物