

653589

李志鹄 编著

中南工业大学

图书馆藏

金属矿床地球化学

床地球化学



● 中南工业大学出版社

金属矿床地球化学

总 论



● 李志鹤 编著

● 中南工业大学出版社

内 容 简 介

本书是运用地球化学基本原理和方法于研究金属矿床成矿理论、找矿评价标志，并用以指导矿产资源勘查和综合利用的新兴边缘学科。它以辩证唯物论为指导思想，引进了天体地质学、比较行星学、数学地质学、工艺矿物学等相邻学科和现代测试技术的最新成就，以适应当前金属需求量增加、品位下降和综合利用的需要。

本书研究金属矿床地球化学的基本原理，如元素在地球各层圈的分布及丰度变化的规律性，元素在地质体间的分配及其制约因素等等。此外还研究地球、元素丰度、地球化学环境、成岩、成矿作用的地球化学演化；成岩、成矿作用的区域和历史地球化学和元素的各种赋存状态等。举例详细说明它在成矿、评价、探索新矿床类型和矿石综合利用中的应用。

本书可供硕士研究生和大学矿产普查与勘探、矿床、地球化学、岩石、矿物等专业作教材或参考书，也可供地勘、矿山地质、化探、选矿、冶金等专业技术人员和师生参考。

金属矿床地球化学

李志鹤 编著

责任编辑 雷丽云

中南工业大学出版社出版发行
湖南省地质测绘印刷厂印装
湖南省新华书店经销

开本：787 × 1092 mm 1/32 印张：11.125 字数：259千字

1987年9月第1版 1987年9月第1次印刷

印数：0001—3000

ISBN 7-81020-074-7/P·007

统一书号：13442·027 定价：1.80元

前 言

金属矿产资源的需求量随着世界人口的增长、工农业生产和军事工业的发展，数十年来一般约以每年3—5%的速度增长。据估计，我国到2000年各种金属需求量将增长3—4倍。但是，矿产资源勘查工作的迅速发展，使地表直接出露的矿床已急剧减少，当前勘查重点为找寻盲矿体，因此，找矿难度增大，找矿费用也因之增高。今后将更依靠新的理论指导；找矿对象也从以富矿为主逐步转向易采、选、冶，并且规模庞大的品位低的矿床。矿石综合利用在先进国家已竭力向“无废物利用”目标前进；以上发展趋势将因金属需求量增长，采、选、冶技术的发展，呈与日俱增的趋势。传统的矿床工业类型也逐步为新的类型所取代。从而提出一个问题：金属矿床学将如何发展方能适应以上发展趋势。

作者认为，金属矿床学的发展和其它学科的发展一样，也必需走学科间相互渗透、相互扩散，不断发展边缘学科的道路。金属矿床学是一门综合性很强的学科，自然更需如此。

首先，金属矿床学必需适应金属需求量增长和品位下降的要求。当前，低品位、大储量、新矿床类型的发现和利用为储量大幅度增长作出重大贡献。和过去以富矿为主，所要研究的对象不同，成矿作用和成岩作用间已难划分出截然的界限，因此凡使成矿金属产生一定程度富集的地质作用都应为金属矿床学“今天”或“明天”研究的对象，从而金属矿床学和研究元素分布、分配、迁移、富集规律的科学——地球化学进一步结合，逐步形成新的边缘学科——金属矿床地球化学，这是金属

矿床学的一个发展方向。

其次，金属矿床在地球上的分布，不论从空间和时间上都是极不均衡的，某种金属在极少数地区可能集中全球储量的大部分的现象，已屡见不鲜，而储量地史分布的不均衡性使成矿金属也有“古老”和“年轻”之分，研究矿床空间分布的规律性由于和板块构造学的相互渗透，已取得显著的进展；而地史不同时期分布的不均衡性及其演化规律，显然“将今比古”，是难以说明的，而必须以一切事物都在不断发生、发展、衰亡的辩证观点来指导。当前，天体地质学、比较行星学、同位素地球化学、微体古生物学等学科的发展，又为我们研究太古宙、元古宙的成矿（岩）作用提供辩证研究的可能性。

不仅研究金属富集规律和矿床时、空分布规律性，同时也研究如何有效地利用矿石中全部有用组分，是金属矿床学的第三个发展方向。这就要求在有关学科理论指导下，用先进的测试手段，研究矿石中元素的赋存状态、元素的分配、矿石的工业性能等，才能指导矿石的工艺处理，提高矿石综合利用的效果，减少环境污染。

金属矿床地球化学就是适应上述发展趋势和要求而建立的新边缘学科，它应以唯物辩证法为指导思想，从研究元素在全球和地质体的分布和分配入手，充分引进有关学科研究的最新成就，全面研究成岩、成矿作用的元素迁移、富集机理及其各种外表特征，以便阐明成矿机理，探索有效的找矿评价标志和新矿床类型。同时研究元素在矿（岩）石中的赋存状态和不同矿物相同的分配，以便为有效地综合利用矿石中有益组分服务。

全书分总论和分论两大部分。总论阐述金属矿床地球化学的基本理论及应用，分论讨论内生矿床主要类型成矿（岩）作

用地球化学的基本特征。由于各种因素的限制，暂先出版总论部分。

以上研究任务显然要依靠广大地质工作者共同努力才能完成。本书的编写与其说是对金属矿床地球化学有关问题的阐明，勿宁说是提出编著者在探索中发现的一些问题，提请国内同仁予以关注，共同进行研究，使之逐步形成较完整的学科体系，为提高我国矿产资源勘查效果，更充分地综合利用矿产资源服务。本书可用作地质、地球化学矿床、矿物等专业的大学、研究生、研究生的教科书，也可供广大地质生产和科研人员参考。书中所引用的资料，大多来自地质生产、科研第一线同志的劳动成果，很多属于内部文献，未能在参考文献中反映，谨向他们表示谢意。本书初稿曾在成都冶金技术干部进修学院、昆明工学院地质工程师研究班、研究生班等试用，效果较好，定稿中又承我院地质系矿床地球化学学科组教师和研究生提出修改意见，并代清抄文稿，舒克宽同志代绘插图，在此一并表示感谢。

由于编著者水平所限和定稿时间仓促，本书定有许多谬误之处，尚请读者指正。

编著者

1986月12月

目 录

结 论	(1)
一、金属矿产资源需求、勘查和利用的发展趋势	(1)
二、金属矿床地球化学及其研究任务	(8)
第一章 成矿物质的来源及其在地球各层圈的分布	(13)
第一节 成矿物质的来源	(13)
第二节 地壳的物质组成和元素丰度	(19)
第三节 地幔的物质组成和元素丰度	(43)
第四节 地核的物质组成和化学成分	(63)
第二章 元素丰度的类型及其概率分布、矿产资源评价和成矿富集系数	(69)
第一节 元素的原子丰度和浓度丰度	(69)
第二节 元素呈不同浓集程度的概率分布	(75)
第三节 矿产资源评价和成矿富集系数	(85)
第三章 成矿元素在成岩和成矿作用中的分配	(99)
第一节 概 述	(99)
第二节 分配系数的理论	(102)
第三节 用地球化学模拟实验研究元素的分配	(115)
第四节 地质观察和成矿元素分配的平衡计算	(116)
第五节 成矿元素分配研究举例	(139)
第四章 元素的地球化学亲合性和晶体场配	

	位场理论及其应用.....	(148)
第一节	元素的地球化学亲合性.....	(148)
第二节	晶体场理论和配位场理论及其在金 属矿床地球化学中的应用.....	(163)
第五章	元素在矿石中的赋存状态及其研究意 义.....	(186)
第一节	矿物.....	(186)
第二节	类质同象.....	(201)
第三节	其它赋存状态.....	(208)
第四节	金属矿产资源赋存状态研究举例.....	(216)
第六章	元素丰度、地球化学环境、成岩、成 矿作用的地球化学演化.....	(222)
第一节	全球金属矿产资源分布的时、空不 均衡性.....	(222)
第二节	地球的演化和地壳(岩石圈)元素 丰度的演化.....	(227)
第三节	地球化学环境的地史演化.....	(234)
第四节	岩浆岩的演化及其成矿意义.....	(243)
第五节	矿床的演化.....	(248)
第七章	含矿岩体和矿床的地球化学类型和成 矿区域及历史地球化学.....	(262)
第一节	含矿岩体和矿床的地球化学分类.....	(262)
第二节	成矿区域和历史地球化学基本概念.....	(276)
第八章	金属矿床地球化学在矿产资源勘查和 综合利用中的应用.....	(293)
第一节	地球化学探矿.....	(293)
第二节	矿物—地球化学探矿.....	(297)

第三节	应用岩体地球化学特征预测区域成 矿远景及岩体含矿性.....	(308)
第四节	探索矿床新类型.....	(331)
第五节	矿床综合评价和矿石综合利用中的 研究.....	(339)

绪 论

一、金属矿产资源需求、勘查和利用的发展趋势

矿产资源是人类生产、生活不可缺少的基本原料，也是我国社会主义四化建设的重要物质基础。矿产资源的勘查、开发和利用，在人类社会的发展进程中起着极其重要的作用。

几千年来，我国劳动人民在矿产资源的勘查、开发和利用中，积累了许多有关矿产的分布、形成、共生、产状和利用的资料。如早在春秋战国时期，《山海经》山经中已记载金属产地170多处，包括金、银、铜、铁、锡等十多种金属，还有很多玉石的产地；《管子》地数篇“山上有赭，其下有铁……山上有铅，其下有银”的记载，体现了朴素的矿床分带性和元素共生的思想；《汉书地理志》已报导石油、天然气井、盐井、铁矿山多处；唐代《酉阳杂俎》首先记载了植物找矿：“山上有葱，下有银，山上有薤，下有金，山上有姜，下有铜、锡……”等等。

中华人民共和国成立后，在党的正确领导下，通过广大地质工作者的辛勤劳动，我国矿产勘查工作取得了丰硕的成果，科学研究工作蓬勃发展，并取得初步的经济效果。我国已找到约150种矿产，其中钨、锑、稀土、锡、钼等金属，硫、磷等非金属原料，菱镁矿等冶金辅助原料，石膏、沸石等建材原料，探明储量均名列世界前茅；虽然还有一些稀缺矿种如铬铁矿、金刚石等，但仍不失为世界上矿产资源比较完备，储量比较丰富的少数国家之一。

地质学研究工作近年来也取得很大的进展。全国各省几乎都建立了有关矿产资源勘查和利用的科学研究机构，初步提出

一些符合我国实际的成矿理论，广泛开展成矿预测和各种物、化探工作，1/20万地球化学扫面工作在部分省区已接近完成，伴生元素综合利用也有较大的发展，环境保护也受到重视……，这些都为保证我国社会主义四化建设胜利完成创造有利条件。

当前，编者认为金属矿产资源需求、勘查、利用具有以下主要发展趋势：

1. 金属需求量持续增长，矿石要求品位逐步下降。

世界和各国到2000年每年需要多少金属矿产资源才能满足工、农业生产及军事工业发展的要求，这是各国政府和广大学者都十分关注的问题，因此很多单位和人员都进行研究，并纷纷提出估计数据供有关当局参考。由于研究的方法和各国经济基础不同，估计的数据亦各异，但增长的总趋势则是一致的。一般认为世界金属年增长率介于3.4—5.5%之间，稀有金属的增长率因国防工业发展的需要，年增长率可能达到10%以上，个别金属如铀可能更高一些。

据美国采矿局的估计，到2000年世界金属需求量为：铜将增长3倍，锌1.7倍，金4.5倍，铅9倍，铀将增长20余倍，并且如果世界人口继续增长，则矿产资源的需求量将以加速度的速率增长；A. D. 舍格洛夫 (Shcheglov 1979) 对苏联20年中金属消耗量增长的估计为：铝矾土8倍、铜矿6倍、锌矿5倍、钼矿3.8倍等。

据中国地质学会矿产资源保护综合利用委员会(1982)的估计：到2000年，我国各种矿产资源的需求量将成倍增长，铜将增长4.83倍、锌4.2倍、镍4.3倍、铝5.3倍、铁矿石4.7倍、石油5.2倍、煤5倍等。

全球金属矿产资源需求量的迅猛增长导致仅依靠富矿石已

远不能满足需求，从金属不同丰度概率分布的理论研究和金属矿产勘查、利用的现状，都得到了共同的结论：金属矿石品位的逐步降低是长期发展的必然趋势。例如一百年前，铜矿石要求含铜量需达3%左右，现在非斑岩型矿石一般仅要求含铜0.5%左右，当伴生较高的金、银等有益伴生元素时，品位仍可适当降低；斑岩型铜矿估计到本世纪末，品位可降至0.15—0.2%，这种品位逐步降低的趋势，将长期保持下去；镍也与铜相似，硫化镍矿石在1953年需含镍1.2%以上，1965年则降至0.84%，至1972年又降至0.66%，1980年则含0.5%左右即可经济利用，红土型硅酸镍矿石因冶炼消耗能量较高，要求品位也随之提高，但品位逐步下降的趋势，则和硫化镍矿石相同。其它金属也相类似。

2. 找矿的难度逐步增大，并导致找矿费用的增高。

众所周知，矿床按其与地表出露关系可以分为三种类型：

(1) 矿床本身或上部氧化带在地表出露的；

(2) 矿体虽未出露地表，但和矿体伴生的蚀变带出露地表或地表已形成明显的地球化学异常晕圈；

(3) 地表无任何矿化或地球化学异常晕圈，矿体隐伏在地下深处。

纵观找矿历史就是从第一类向第二类再向第三类逐步发展的。我国绝大部分地区已完成二十万分之一区域地质测量和找矿工作，（至1983年底，1/20万正规区调已完成610万 km^2 ，占大陆面积的63%）。现在第一类矿床出现的可能性已急剧减小，今后勘查重点为第二、第三类型矿床。因此，没有符合我国地质实际的成矿理论指导，没有有效的成矿预测和找矿方法，盲目的开展钻探等探矿工程，则必事倍功半，甚至徒劳无功，造成大量人力、物力的浪费。

P. A. 贝利 (Bailey, 1981) 系统研究了 1943—1976 年间西方发现斑岩铜矿采用的方法, 统计说明在 1967 年以前, 通过化探和物探找到的斑岩铜矿约占 25%, 在理论指导下找到的约占 75%; 1969 年后全部斑岩铜矿基本上均在理论指导下发现, 但因隐伏矿日益增多, 找矿难度增大, 勘查费用仍不断上涨。据 J. D. 洛厄尔统计, 1966 年间, 在西南美洲发现一个斑岩铜矿仅需两千万美元, 十年后则增至五千万美元, 十年间, 勘查费用增高一倍半。

我国的找矿实践也说明金属矿床勘查难度不断增长, 勘查费用持续增高, 开展成矿理论研究十分必要。例如据胡伦积 (1982 年) 的统计, 从 1950—1980 年三十年来, 我国地质部系统所属各地质队经勘探已取得较大储量的矿床共有 350 个, 其中地表矿占绝大多数; 如将三十年划分为两个阶段, 则第一阶段 1950—1965 年十五年间共发现和勘探 280 个矿床, 占三十年勘探矿床的 $4/5$, 而第二阶段 1966—1980 年间仅发现和勘探 70 个矿床, 占 $1/5$ 。此统计数据形象地说明了在我国找矿难度的增长。

由于找矿难度增长必然导致找矿费用的增高。国内外一些学者对此进行了估计和研究: 周昌龄 (1981) 估计几十年中我国找矿费用平均增长约 2—5 倍。贝利 (1981) 统计从 1951—1970 年在加拿大找矿勘探中每一加元所得到的收获, 在消除通货膨胀影响后, 得到找矿勘探费用在 20 年中, 平均以 3% 的速率增长。以下为在不同年代区间内, 每加元可获得的矿产资源价值:

1951—1955 年, 平均每加元可获得 160 元的矿产资源;
1956—1960 年, 每加元可获得 110 元的矿产资源; 1961—1965 年, 则降至 95 元; 1966—1970 年, 每加元仅可获得 55 元的矿产

资源。

H. W. 施顿伯和M. E. 埃默森统计美国30家大公司的金属矿产勘查费用(不包括铁、铅和铀),除去通货膨胀,从1961年至1985年间增长了4倍以上, A. W. 罗斯和R. G. 埃格特用勘查“成功率”(发现矿产总值/勘查总费用)计算勘查费用的增长,认为美国从1955年到1985年,发现价值一美元的金属资源所需费用增长了9倍(按1981年不变美元值计算),编者认为此增长率可能估计过高。

综上所述,找矿难度增长和找矿费用的增高已成为世界的总趋势,此趋势如不依靠在理论上的突破和技术上的提高,必将以更快的速度发展下去。

3. 新矿床类型探索的必要性

金属矿床的形成是由于金属元素的富集作用,金属元素在地壳中分布、分配,分散、富集是有一定规律的,大量金属元素高度富集形成大而富的矿床仅能是极为个别的特例;从历史上看,矿产资源的利用趋势也是向开采低品位,而适合于露天开采的易选、冶的新矿床类型发展。由于发现了新的矿床类型使矿产储量大幅度增长的例子很多。例如低品位的斑岩铜矿新类型的利用,使铜矿的储量呈数量级的增长,斑岩型钨矿,锡矿、铅-锌矿等新类型的发现和利用,也正在改变钨、锡、铅-锌等矿储量的面貌;卡林型金矿的发现使美国金矿储量顿然改观……;甚至地下热卤水作为碘、溴、硼、镁、锂等金属的资源,铁锰结核作为铜、镍、钴的潜在资源,红海深渊下的软泥作为多金属的资源等等。因此,新的矿床类型的有效探索(其前提为元素的富集)对扩大矿产资源的远景有十分深远的意义。

4. 矿产资源综合利用的发展

金属矿产一般都具有多种矿物、元素共生及不能再生的特

点,对矿床中各种有用元素进行充分的和有效的利用,对降低矿物原料成本,扩大矿产远景以弥补资源不足及保护环境等均具有重要意义,因此党和政府均十分重视矿产资源的综合利用。例如我西南某钒钛磁铁矿矿田是一种以铁为主(但一般含铁仅30%左右,属中贫矿石),伴生钒、钛、铀、锆、硫、钴、镍、铜、镓、铂族元素等十余种有益组份的一组特大型共生矿床,其伴生元素拥有庞大的储量,并且其经济价值远远超过铁矿本身的经济价值,如不能有效合理地利用伴生元素不仅在经济上造成重大损失,而且环境污染严重,将长期危害人民和子孙后代的身体健康。此外,有些稀散元素,如钒、钛、镍、锆、铜、镓、等金属,综合利用几乎是这些元素的唯一来源。拟定技术上可行、经济上合理的综合利用方案,首先要求对矿床的物质组分、赋存状态等进行系统的金属矿床地球化学研究,作为矿床综合评价和综合利用的基础。

应当指出,近几年来由于一系列国际地学合作计划的执行,尤其是国际大地测量地球物理联合会和国际地质科学联合会提出的“国际固体地球科学研究规划”的顺利执行,其中心为研究岩石圈的成因、演化和动力学等课题;大量深海探测和钻探提供了许多新资料;一些国家开展1/20万或1/25万地球化学扫面;多种新矿产资源类型的被发现和利用;相邻学科如天体地质学、比较行星学、微体古生物学等的发展,使我们对前寒武纪地质历史及其成矿作用有了崭新的认识;各种测试手段的日趋精密化和微区化;同位素地球化学应用的日趋广泛和精确化;实验地球化学可控范围日趋广泛和控制条件更为准确等等,为金属矿床学理论的发展和找矿勘探实践提供了必要的养料,也修正一些传统的错误观点和认识。例如传统观点认为金属矿床仅形成于地壳上部二至三公里的狭窄范围内,但通过

苏联科拉半岛超深钻的结果说明，不仅在1665~1830公尺的深度上见到Cu-Ni矿化，而且在6.6~9.5公里的深处也发现低温热液型Cu、Pb、Zn、Ni、Ag等矿化，这表明不仅地壳表层有利于内生金属矿床的生成，而且深层也可能形成内生金属矿床。如果此发现具有普遍意义，则今后寻找和开发深部矿床将成为一项越来越突出的任务。

此外，现代成矿作用的研究，其中包括海底喷气作用的观察和研究，对块状硫化物矿床形成的机理有了进一步了解；在岩浆成矿理论方面，现在更重视形成岩浆物质的原始成分，相容和不相容元素在岩浆形成和岩浆演化中的行为，及岩浆形成同时或形成前后的地质构造环境对岩浆成矿专属性的影响，地球、元素丰度、地球化学环境、岩浆岩以及矿床的演化观点逐步代替了传统的“将今比古”的观点，正不断改变着传统的成矿理论的概念等等。

前已指出，成矿理论新的发展和突破对我寻新的矿产资源的重要作用，现以南澳大利亚奥林匹克坝超大型Ca、U、Au矿床的发现历史为例，说明成矿理论的研究，尤其是地球化学理论和金属矿床学的研究相结合，对金属矿床理论的发展及矿床的勘查工作具有重要的意义。

1972年6月，D.W.海恩斯(Haynes)在研究南澳大利亚元古代和早古生代文献基础上，撰写了“沉积铜矿床的铜的来源、铜的搬运和铜矿的沉淀等问题”的博士论文，指出大陆玄武岩在某些蚀变中能释放出大量的铜，这些铜就是沉积铜矿床的物质来源，而经过蚀变的玄武岩为源岩可作为圈定找铜矿靶区的参数之一。海恩斯通过地质文献的研究和实际踏勘，指出南澳大利亚斯图尔特陆架地区为最有利的成矿预测区。在新测区第一钻就打到了38米厚含铜1.05%的矿化段，系统钻探后，已获

得约20亿吨矿石储量，矿石平均含铜1.6%，含 U_3O_8 0.6公斤/吨和含金0.6%克/吨。金属储量分别达到3200万吨铜，120万吨 U_3O_8 和1200吨金，为特大型Cu-U-Au的综合矿床。

必须指出，现在对金属矿床形成机理的认识，除砂金矿床、蒸发盐矿床和红土型矿床等表生矿床了解比较透彻外，对于斑岩铜矿床，沉积锰矿床，土耳其型豆荚状铬铁矿床等知识尚不完整，而对于其它类型矿床的知识尚多未能摆脱描述阶段。因此，G. J. S. 戈维特 (Govett, 1983) 认为“矿物勘查在经济上是高度冒险的事业，甚至就是赌博，其成功率一般为100:1”，在成矿理论研究和地球化学紧密结合上，许多学者提出自己的认识，如R. D. 埃利特 (Ellet, 1982) 提出“新的成矿理论若不与相关科学，尤其是地球化学的齐头并进，也就难以产生”。A. H. 奥夫奇尼可夫(1983)指出“近十年来，地质科学各领域的巨大进展，在许多方面都是广泛应用地球化学理论和方法对地球物质及其成分、结构和性质与存在环境之间的关系进行研究所取得的”。为了更深入地对具有经济意义(或潜在经济意义)矿床类型的了解，就必须要求地质工作者运用相邻有关学科和技术的最新成就，不断发展传统的地质科学，创立新的边缘学科，探索在成矿和成岩过程中元素的分布、分配、运移、分散、富集、共生的规律性，提高矿产资源的综合找矿，综合评价和综合利用的效果。金属矿床地球化学就是一门急待创建和发展的边缘学科。

二、金属矿床地球化学及其研究任务

金属矿床地球化学是介于金属矿床学和地球化学之间的一门边缘学科，它从全球观点出发，运用地球化学的原理和方法来研究金属在成矿(岩)作用的行为，其任务为探索金属造矿