

金属矿床地球化学的研究前沿

王瑞廷^{1,2}, 毛景文², 王东生¹, 赫英³

(1. 西北有色地质勘查局, 西安 710054; 2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 西北大学地质学系, 西安 710069)

摘要: 地球化学和矿床学的进展推动矿床地球化学主要在成矿理论和分析测试方法两个方面获得进展和突破。分析了金属成矿理论在构造与成矿、金属成矿省演化与成矿、超大型矿床寻找和探索理论研究等 8 个方面的进展, 以及多种高精度、高灵敏度的微区、微量分析测试技术的应用情况, 并对当前金属矿床地球化学的研究前沿及其主要科学问题进行了探讨。

关键词: 金属矿床; 矿床地球化学; 成矿理论; 测试技术

Research Frontiers of Metal Ore Deposit Geochemistry

Wang Rui-ting^{1,2}, Mao Jing-wen¹, Wang Dong-sheng², He Ying³

(1. Faculty of geosciences and resources, China University of geosciences, Beijing, 100083; 2. Bureau of geological exploration for nonferrous metals in northwest china, Xi'an 710054;

3. Department of geology, Northwest university, Xi'an 710069)

Abstract: The development of geochemistry and mineral deposits promote ore deposit geochemistry to break through and get on two aspects, metallogenic theory and analyzing method. The progress of metal metallogenic theory in eight aspects are stated, such as tectonics and metallogenesis, metal metallogenic province evolution and metallogenesis, and theory research of exploring and seeking after superlarge deposit, and so on. So do the applicable situation of many high precision, and high sensitivity micro-area, microcomponent testing techniques. Moreover, the modern research frontiers of metal ore deposit geochemistry and its main scientific questions are also discussed.

Key Words: Metal ore deposit, Ore deposit geochemistry, Metallogenic theory, testing techniques

现代矿床地球化学是围绕着成矿物质和成矿流体的来源、迁移形式及动力、析出条件与方式、成矿作用机理、成矿作用动力学等基本问题深入展开的。并随着地球系统科学研究的不断深入, 引入许多相关及相邻学科的研究方法与手段, 以全球构造为背景, 深入到成矿地球动力学的层次上, 研究成矿作用的宏观与微观过程, 在超大型矿床成矿机理、大规模成矿作用爆发、深部成矿流体、地幔柱成矿作用、热水沉积成矿作用、生物成矿作用、壳幔循环与成矿作用、大型矿集区预测、成矿作用的时空结构等新领域取得了一些新的认识和进展, 形成了成矿作用与成矿地球动力学这一当代矿床地球化学的重大前沿研究领域。

1 矿床地球化学的现状与进展

当前, 矿床地球化学已形成了以成矿作用为研究核心, 以现代分析测试和实验技术为手段, 以历史地球化学的理论和观点为指导的较完整的学科知识体系。

1.1 金属矿床地球化学的现状

目前, 矿床地球化学的研究对象已从矿床转移到了矿产资源并开始注意矿床的环境质量; 从矿床成因、成矿模式研究转移到成矿作用机理、成矿作用动力学及矿床分布的时空结构研究; 从宏观、浅部、单个矿床研究转移到微观(如包裹体、单矿物、纳米级微粒等)、深部、成矿区带甚至全球成矿背景研究; 从常

收稿日期: 2003-07-14

作者简介: 王瑞廷(1969-), 男, 高级工程师, 博士后, 主要从事矿床地球化学及金属矿产勘查研究。

见成矿元素、矿床规模、物质组分研究转移到稀有分散成矿元素(如 Te、Ge、PEG 等)、超大型矿床、生物有机质流体成矿作用研究等等,在研究方法上更多地引入了计算机技术、3S 技术、成矿过程数字动态模拟技术以及高新分析测试技术等。这在金属矿床地球化学研究方面尤为突出。

1.2 金属矿床地球化学的进展

金属矿床地球化学的进展主要体现在成矿理论和分析测试方法两个方面。

1.2.1 成矿理论研究

构造与成矿。分为全球构造与成矿和深部构造与成矿。前者把矿床形成作用放在全球构造和地史演化的背景上进行研究,从而把成矿作用与板块构造机理密切结合起来。近年 Gurnis 和 Murphy 等人提出了超大陆旋回,并发现超大陆旋回与金属成矿巨旋回之间具有惊人的一致性,特定金属矿床的成矿期与超大陆的离合期一致。后者通过研究深部地壳结构、地幔作用及壳幔循环等,了解内生金属成矿作用的深部条件,研究区域成矿规律,进行矿产深部预测。一些学者以为,源于地幔等地球深层次的深部构造控制和影响着地壳上部矿床的形成和分布,以地幔异常隆起构造为代表的深部构造与成矿作用关系密切。

金属成矿省演化与成矿。金属成矿省随地质历史推移演化,其主要研究在开放体系中壳-幔相互作用和成矿作用非平衡态的动态成矿过程,探讨在一定“成矿构造场”内出现相对平衡态时金属成矿省的形成机理。裴荣富等研究认为,控制金属成矿作用平衡态产生的成矿省的内部结构及其演化通常是按不同级次发展的,即“景”(成矿地质构造背景)、“场”(异常成矿构造聚敛场)、“相”(金属成矿相)、“床”(矿床)4 个成矿等级体制耦合。这 4 个等级体制的耦合梯度是评价或预测成矿远景区的依据。成矿省是成矿域、成矿省、成矿带、成矿亚带 4 级成矿单元中的二级成矿单元。每个成矿省属于一个特定地区,它们在岩石圈演化中形成一组或多组在时空演化上有密切联系的特定矿床群。

超大型矿床寻找和探索理论研究。近 20 年来,超大型矿床的形成背景和成矿作用过程及其找矿预测成为矿产资源研究的重要方向。涂光炽先生早在 1996 年就提出了超大型矿床的寻求和探索理论研究的内容、方法及条件。研究表明:超大型矿床矿化类型具有明显的选择性,对某一金属和非金属而言并非所有矿床类型都可以形成超大型矿床。一般情况下,某一

矿种的矿化类型中有一、二个或二、三个类型可以形成超大型矿床,其出现的概率是不同的;全球超大型矿床往往局限于地质历史的某一时期形成,具明显时控特征;超大型矿床具有多期多次成矿作用和多元素综合成矿特征,且其多元素各自均能达到巨大矿床的规模;构造因素对超大型矿床形成具有重要意义,大型或深部构造尤为关键。

大规模成矿作用与大型成矿密集区。大规模成矿作用研究是超大型矿床研究的一种延伸或展开,不仅研究成矿区带中的超大型矿床,还研究相关的其他矿床,探讨矿床形成过程、时空分布规律和不同规模矿床之间的内在联系。大规模金属成矿作用是一种重大地质事件,它与区域地质-地球物理-地球化学环境密切相关。其研究基点是成矿地球动力学,关键科学问题是从地幔和陆壳深部寻找成矿作用的根源。已有研究初步表明:大规模成矿作用是地质历史演化中某些特殊环境下的产物,其发生不拘泥于一般规律,常对应着一些特别事件,表现为突发或爆发成矿;大规模成矿作用必须有巨量物质供给;大规模成矿作用必然有巨大能量供给,与大规模热事件密切相关;流体在大规模成矿作用过程中既充当能量传递的媒体,又是成矿物质输送和交换的重要介质。

地球内部流体与金属成矿。地球深部流体是多种成矿作用中的关键因素,也是寻找新类型矿产资源和获得新的成矿理论和找矿思想的生长点。流体地质研究表明:流体对金属和烃类的搬运在几乎所有矿床和油气藏的形成中都起到了必不可少的作用;成矿金属的运移与油气运移机理大体相同,很多金属矿床和油气藏在时间和空间上都有密切的成生联系;大陆超深钻探发现在结晶岩 8~12 km 深度下仍有明显的(次生)孔隙度和大量高度渗透性的自由孔隙流体,且流体中成矿金属元素含量很高,甚至还有微生物活动迹象,说明深部存在着强烈的流体-生物-成矿作用;地壳规模的流体运移对金属矿床形成与分布具有重要的控制作用,应用大规模流体运移成矿的新模式,解释了典型的中、低温热液和层控型金属矿床的一些问题;成矿流体发生垂向或侧向迁移的驱动机制大体有 4 种,即:重力驱动机制、热驱动机制、构造动力驱动机制、物理与化学动力驱动机制。

现代金属成矿作用。海底直接观察到的目前正在形成的沉积硫化物矿床,对某些古代层状多金属块状硫化物矿床所提出的海底热卤水成矿、火山热液-沉积或喷气-沉积等成因假说,提供了较客观的实际依

据:西太平洋成矿环境与特征可作为大陆上相关矿床的对比标志;太平洋东部多金属结核中存在生物成因的Fe、Mn成矿元素;西太平洋的钴结壳和磷块岩规模巨大,具有很大的资源潜力,且结壳中含较高的贵金属-铂族元素,可综合利用;海洋中的各种金属矿产,它们的成矿物源主要来自与地幔柱有关的流体。内生物源规模巨大,且与构造活动有关,不同类型的构造地貌单元可形成不同类型的金属矿产。

生物成矿作用及低温成矿作用。生物成矿作用,尤其是微生物对成矿的贡献相继取得了一系列成果。研究表明:生物可以在许多阶段(如沉积、成岩、构造和变质作用、风化、成矿等过程)参与作用,但在不同的成矿阶段生物成矿作用的重要性和表现形式完全不同;生物、有机质对Fe、Mn、Mg、Cu、Pb、Zn、V、U、Cr、Ni、Mo、Co、Au、Ag、Pt、Hg、Sb、S、P、As、Se、I及许多稀有分散元素具有很强的析离、运移和沉淀能力;微生物通过直接聚集成矿元素而成矿。同时,元素的低温地球化学(指温度在200以下的地球化学过程)行为对贵金属有特殊的意义。研究表明,相当多数的成矿过程及蚀变作用发生于200以下,低温下生物参与的成矿作用是某些金属矿种(如Au等)重要的成矿方式。

成矿模式、成矿系列、成矿谱系与成矿系统。从矿床成矿模式、区域成矿模式到四维空间动态成矿模式取得了很大进展,并对金属矿产勘查起到了促进作用。矿床成矿视为地质历史发展过程中所形成的地质环境的组成部分,其本身是四维空间的成矿整体,它们在地史演化过程中从空间的分布、成矿物质的组成都经历着演化并有一定规律。成矿谱系与成矿系统方面的研究目前取得了一些成果,但还是初步的,需要继续深入。

1.2.2 高新测试技术及其应用

分析测试的新方法和新技术的建立、应用及高精度、高灵敏度的分析测试结果,对于发展矿床地球化学理论有着极为重要的作用。近年来,除了传统的分析方法,如发射光谱法、原子吸收光谱法、火焰光谱分析、X射线荧光光谱、多道能谱、中子活化等离子体光谱质谱分析以及各种专项分析技术等,向着快速、价廉、多元素、低检测限及无损分析的方向发展外,微分析技术有了迅猛发展,如质子诱发X射线发射(PIXE)和离子探针分析(IMA)微束技术、激光熔蚀-等离子体质谱(LA-ICP-MS)、同步辐射X射线荧光分析(SXRF)、激光探针、扫描质子微探针(SPM)、二次离子质谱(SIMS)等。另外,仪器联用技术,如气相色谱-质谱联用等,也取得了一些进展,色谱-质谱在线技术(EA-MS)已用于测定同位素比值。值得一提的

是上世纪80年代以来,同位素质谱分析技术的重大进展直接推动了矿床地球化学的发展,如高丰度灵敏度质谱计、加速器质谱、回旋共振傅立叶变换质谱、负热离子质谱等的研制、开发。应用负热离子质谱分析 ^{187}Re - ^{188}Os 同位素对金属矿床进行定年和示踪研究,对于成矿作用过程的精细年代学测定、成矿过程动力学研究等也具有深远的意义,而且 ^{187}Re - ^{188}Os 定年系统以及钨同位素组成的变异是了解行星体及岩石圈演化的重要途径。研究与以超镁铁质组分为特点的幔源物质有关的金属矿床,Re-Os同位素方法几乎是不可取代的精尖定年技术,值得普及。目前,钼矿床、镍矿床的Re-Os同位素研究方面成果较多。

2 金属矿床地球化学的研究前沿

地球动力学演化、大规模成矿作用与大型矿集区的形成。从成矿地球动力学角度,研究地球动力演化、大规模成矿作用爆发与大型矿集区的形成背景、机制和制约因素,并探索大型矿集区的预测方法。其成矿动力学分析从成矿域、成矿带和超大型矿床或典型矿区3个层次上展开,揭示成矿超带、矿集区、超大型矿床形成的环境条件以及大型矿集区的结构构造、壳幔循环和深部过程与成矿作用之间的关系。

超大型矿床形成的地球化学背景、机理和全球对比。研究形成超大型矿床的巨量成矿物质堆积的背景和机理,确定超大型矿床的勘查战略和找矿方向。

流体成矿系统与成矿作用。研究成矿流体运移路途发生的物理、化学和时空上的各种变化及地球化学过程,查明由矿源岩-矿质传输迁移路途-矿床定位空间构成的流体成矿系统的结构、类型和演变规律。重点研究深部流体成矿作用和地球内部流体成矿作用动力学。

金属成矿作用的地球化学动力学及地球化学热力学研究。包括大型、超大型矿床和矿集区形成的地球化学动力学背景、大陆深部结构与成矿作用、大陆成矿动力学、海洋成矿动力学、成矿体系的演化及时空结构、全球成矿体系、成矿系统动力学、成矿谱系与成矿多样性、构造体制和流体运移对矿床规模及品位的控制等问题。

金属-CO₂-烃类相互耦合与成矿作用。即金属、非金属、煤、油气成矿作用的统一整合研究。

非常规金属矿产资源的地球化学研究。

3 金属矿床地球化学主要科学问题

在金属矿床地球化学研究取得多方面进展的同

(下转第96页)

由于中间运输巷上部的三角形矿柱(高度 5.5 m)存矿较多,所以在整个回采单元结束采出矿之后,再对三角形矿柱从中部向东、西两侧用浅孔进行回采。

3.3 地压管理

根据出矿情况,在每个堑沟出矿结束之后把东、西端的出矿联络道及出矿穿脉进行密闭,让其顶板自然崩落;为了达到更好的空区处理及排废目的,要求把切割井施工至上一中段,给上一中段创造排废条件。

3.4 采矿方法对比

3 种采矿方法的主要技术经济指标及优缺点对比见表 1。

表 1 各种采矿方法优缺点对比

对比项目	单元矿块堑沟连续推进崩落法	平底结构空场法	电耙出矿有底柱半中空场法
万吨采掘比(m ³ /万t)	400-450	700-1000	800-1000
采出矿损失率(%)	4	9	15
采掘矿贫化率(%)	6	10	12
采准施工时间(月)	5	5	12
采场出矿能力(t/d)	600	600	300
采出矿安全性	安全	较差	安全
采准作业条件	好	好	差

(上接第 65 页)

时,也存在着一些薄弱之处,概括如下:

开放体系成矿研究不够,需要加强;

成矿物质来源问题未能真正解决,应继续深入;

分散元素成矿和低温成矿作用需加大研究力度;

对具体地区地质演化特点不够重视;

矿床/勘查地球化学分析数据的质量仍需提高。

面对不足与缺陷,结合矿床地球化学研究的学科前沿,21 世纪金属矿床地球化学面临的主要科学问题是:

金属元素超常富集机理研究:需要从成矿流体、大陆动力学、壳幔相互作用、基底成矿元素组成特征、特殊态成矿物质研究及基础地质研究等方面进行深入探索;

突发地质事件或地质过程的突变与大规模成矿作用爆发的耦合机理研究;

短缺金属矿种的成矿作用研究;

从国内外的情况来看,现代矿床地球化学正处于转折和调整时期,虽然面临不少困难,但仍然

4 结论

综上所述,建议对 92[#]矿体采用“单元矿块堑沟连续推进崩落法”进行回采,但应注意以下几个问题。

掘进产出的绝大部分是废石,在施工之前应准备好充足的排废点;

由于 92[#]矿体部分矿段褶皱较多,该部分矿界变化较大,所以要求地质、采矿技术人员在掘进过程中跟踪到位,在条件允许的情况下,对采掘工程进行局部调整,以减少采出矿贫化及工程浪费;

扇形孔孔量较大,在炮孔设计时应着手对此问题进行研究,尽可能地减少扇形孔孔量,爆破装药时应提高装药质量,扇形孔口部分 2 m 不应装药,以减少炸药单耗;

在回采 II、III 块时,要在采场周边布设采区溜井以加快出矿速度,减少可能冒顶而引起的贫化。

存在较好的发展机遇。新世纪,我国金属矿床地球化学的发展目标应是以大型矿集区为研究核心,以成矿作用动力学为理论指导,以巨量成矿物质聚集条件为根本基础,建立重要金属成矿区带的成矿大陆动力学模型,发展大陆成矿理论,探索新的成矿理论和找矿方法,为确定国民经济发展所需的金属矿产资源战略基地提供坚实的科学依据和方法指导。

参考文献:

- [1] 张本仁,骆庭川,高山,等.秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究[M].武汉:中国地质大学出版社,1994,257-311.
- [2] 国家自然科学基金委员会.自然科学学科发展战略调研报告—地球化学[M].北京:科学出版社,1996.
- [3] 於崇文,岑况,鲍征宇,等.成矿作用动力学[M].北京:地质出版社,1998,1-29.
- [4] 中国地质矿产信息研究院.走向 21 世纪的地质与矿产资源[M].北京:地质出版社,1996.
- [5] 陈毓川,赵逊,张之一,等.世纪之交的地球科学 重大地质领域进展[M].北京:地质出版社,2000,1-69.
- [6] 涂光炽.过去 20 年矿床事业发展的概略回顾[J].矿床地质,2001,20(1):1-9.
- [7] 毛景文,张光弟,杜安道,等.遵义黄家湾镍铂族元素矿床地质地球化学和 Re-Os 同位素年龄测定[J].
- [8] 地质学报,2001,75(2):234-243.
- [9] 王瑞廷.煎茶岭与金川镍矿床成矿作用比较研究(博士学位论文)[D].西安:西北大学,2002,1-148.