

金属矿床, 成矿学, 地质背景, 成矿演化

97, 33(1)
13-18

金属成矿学研究的若干进展

p618.205

翟裕生

(中国地质大学·北京·100083)



作者学术简历 1930年生,中国地质大学教授,博士生导师,矿床学专业。在矿田构造、金属成矿、成矿系列、区域成矿、超大型矿床等方面有较系统研究。著有《矿田构造学概论》、《矿田构造与成矿》、《长江中下游铁、铜、金成矿规律》、《成矿系列研究》等7部专著、教材,发表论文70余篇。曾任中国地质大学(北京)校长、中国地质学会副理事长等职,现任中国地质学史研究会副会长、国务院学科评议组成员、国际矿床成因协会矿田构造组主席。

摘要 主要讨论近10年来国内外在金属矿床地质研究中的若干进展,内容包括:成矿地质环境和深部背景;矿床、成矿带和全球的成矿作用演化;成矿系统和成矿动力学;地质流体与成矿作用以及超大型矿床的形成条件等。在这5个重点研究领域,分别介绍了对它们的研究意义和已取得的一些进展,又展望了其在今后的研究前景。认为上述5个方面的系统深入研究,将构成21世纪上半世纪新的成矿理论基础,并将对金属矿产勘查工作有重大影响。

关键词 金属成矿 地质背景 成矿演化 成矿系统 地质流体 超大型矿床

近年来,随着矿产勘查工作的发展和整个地球科学水平的提高,金属成矿学也有了相应的进步。在第30届国际地质大会上,提交的有关金属矿床的论文摘要有600多篇,反映了各国地质学家取得的新成果。现对第30届地质大会内外有关金属矿床地质研究的成就和发展趋势作一简要阐述,以表示对《地质与勘探》创刊40周年的热忱祝贺。

1 成矿地质环境和深部背景

由于找矿需要,地质学家早就注意到成矿的区域背景研究。近年来,地球系统科学的提出和兴起,更强调当代地球科学研究要立足于全球性和统一性的整体观和系统观。在成矿学研究中,矿床被认为是岩石圈系统的一个组成部分,矿床的形成和分布受岩石圈

的组成、结构和运动、演化过程所控制。要深入认识矿床形成的地质构造背景,必然要研究岩石圈乃至水圈、大气圈、生物圈的相互作用的动力学特征和演化过程,研究区域壳幔结构与深部作用对矿床形成的制约和影响,这是当前和今后一段时间内矿床学研究的一个热点,已经取得的成果和认识有:

1.1 地球的壳幔结构和组成是不均一的,包括垂向的层圈性和横向的不均一性。不同地块的地球化学组成的差异是明显的,即富含某些成矿元素组合,而缺少另一些成矿元素组合。这种可能是地球发生早期造成的物质差异性,而这种物质差异性形成各种成矿区带的物质基础,是全球成矿带不均匀分布的主要原因。例如,据对世界14种金属的108个最大矿床统计(戴自希,1996),它们大

本文1996年11月收到,侯庆有编辑。

都分布在两个巨型活动带(环太平洋构造—成矿带、地中海—印尼构造—成矿带)和1个稳定地块(北美、南美、澳大利亚和南非)中。在这些活动带和地块内,超大型矿床又集中在某些地带,形成矿化富集区。一些学者提出,区域成矿带的划分应以壳幔结构和组成的差异性为基础,而不仅仅是根据地壳表层的矿化特征。

1.2 壳幔作用最活跃的地区是地幔柱(mantle plume)所在地,它是深部和浅部进行物质和能量交换的主要地域,是地球物理和地球化学作用最为强烈的地带。地幔柱中的熔浆、热流体等在向浅部运动过程中,或在地壳的某些适宜地段通过分异作用,使金属堆积成矿,如岩浆矿床、火山矿床;或是参与壳幔交代作用,促使地壳中呈分散态的金属达到浓集状态富集成矿,如热液矿床;或是作为“热机”,在某些地域中保持稳定的地热异常系统,为各类成矿物质的运移聚散提供能量。研究表明,很多超大型矿床,如奥林匹克坝、白云鄂博等都有幔源物质和能量的直接参与。

1.3 壳幔作用、岩石圈变动产出各种构造单元(大地构造的、区域的),而一定的地质构造单元生成一定的成矿系统,它们是:在伸展构造体制下由热水沉积形成的多金属成矿系统(如裂谷环境中的喷流沉积型Pb—Zn—Cu—S系统),挤压构造体制下的岩浆热液成矿系统(如与俯冲带有关的火山—侵入岩类Cu—Mo—Au—S系统),以及与剪切、走滑体制有关的热动力成矿系统(如绿岩带韧性剪切带型Au成矿系统)等。深入研究不同构造体制下的成矿特征对区域成矿预测有现实指导意义。

2 金属成矿演化

矿床的形成是地球演化的产物,许多矿床形成后又经历了不同程度的变化。用历史思维去观察研究矿床乃至成矿带和全球的成

矿作用演化,是引人瞩目的矿床学研究方向。

2.1 矿床的形成和保存

矿床研究表明,在矿石、围岩和含矿构造中,都或多或少地保存着成矿过程的有关信息,如矿质和流体的来源、成矿组分的演变与浓集、成矿的温度、压力以及成矿年代等信息。通过精细的现场观测和微观测试可以捕捉到这些成矿信息,结合对矿床地质背景和控矿条件的研究,使我们有可能认识矿床的形成过程,在一定程度上“再造”矿床的形成历史。例如,一些大型矿床常表现为多次富集,如大厂锡—多金属矿、铜陵狮子山铜矿等都是经过海西期热水沉积成矿和燕山期岩浆—热液叠加两个矿化阶段。小秦岭和胶东北变质岩区金矿床则经历了由晚太古—早元古宙矿源层形成、中生代岩浆—热液作用成矿的复杂过程。这种多次富集成矿作用常与区域地质发展的重大事件相关联,从而显示出矿床形成是区域岩石圈长期演化的产物。我国地质构造复杂,古老地块的后期活动性强,构造多旋回明显,因而叠加复合型矿床很发育,这是形成大型、超大型矿床的一种型式,也可以认为是我国金属成矿的一个特色。

2.2 成矿带和全球成矿演化

成矿的历史观不仅对研究单个矿床,而且对成矿带、成矿域直到全球的成矿演化研究都有意义。近年来,成矿省时空演化、成矿时空结构、区域成矿谱系、四维成矿体系、成矿作用演变轨迹和成矿年代学等的提出和引起重视,都说明这种大时段的成矿演化研究有着重要的理论和实际意义。在成矿带演化史方面,我们曾对长江中下游铁、铜、金成矿带作过较系统的工作。在全球成矿演化方面,依据对全球108个超大型金属矿床的统计分析^[1],以每亿年形成的超大型矿床个数计,太古—早元古宙为0.65个,中—晚元古宙为

[1] 翟治生,1996,大型构造与超大型矿床研究,攀登计划A30—06专题报告,中国地质大学。

2.1 个,古生代为 5 个,中生代则增加到 21.7 个,说明随着地史演化,超大型矿床有以近似等比级数增长的趋势。对一般规模矿床来说,也有这种趋势。这说明,随着全球构造演化,地壳成熟度增强,成矿营力种类增多,成矿作用方式加多,聚矿能力加强,形成大型、超大型矿床的机率也多了。当然,中—新生代矿床形成后,一般保存条件较好,也是不容忽视的一个因素。

不同矿种的成矿时代也是不均一的。对形成超大型来说,Fe、U 大多为前寒武纪;W、Sn、Mo、Ag 则集中在中—新生代;Au、Cu、Pb、Zn 等的超大型矿床在各时代都可形成,但有所侧重;Au 以前寒武纪和新生代为主,Pb、Zn 以元古宙和古生代为主,Cu 则以元古宙和新生代为主。这些情况反映了地球化学元素在地球长期演化过程中运移轨迹的差异,常表现为成矿的时控性、突变性和周期性,对其原因正在探索中。

2.3 矿床保存条件研究

矿床,尤其是古老矿床在形成后,又经历了不同程度的变形、变质、热液改造、风化剥蚀等复杂变化。这些变化影响到矿床是继续保存,还是被破坏消失;如果被保存,则它们在现今的产状(露出矿、隐伏矿等)和组份特征又如何?这些都是矿产勘查中首要研究解决的问题。过去的矿床学研究多注重在成矿过程,而对成矿后的矿床变化和保存条件注意不够。为了更全面地认识矿床的形成、变化全过程,更有效地开展找矿工作,应该大力加强对矿床保存条件的研究。

3 成矿系统和成矿作用动力学研究

矿床是一种复杂系统。近年来,成矿系统分析的兴起,促进了对成矿作用的整体认识。成矿系统是指一定的时空域中,成矿物质由分散状态浓集成为工业矿床的作用过程和有关地质因素及地质产物构成的有机整体。成

矿系统是远离平衡态的开放系统,系统与所处环境之间进行着物质与能量的交换。或者说,成矿系统是依靠周围环境提供物质和能量来维持的不可逆过程。通过这种相互作用过程,使成矿物质逐步浓集到人们可以经济地利用的程度(矿床的形成)。根据已有的研究认识到,成矿系统在时间上是长时段的,一个成矿系统从产生、发展到终止,一般需要上百万年到上千万年的时间。一个发育完整的成矿系统,包含不同类型、不同规模的矿床及有关的矿化和异常。当一个成矿系统中各种控矿因素在特定局部地段形成最佳组合时,则可形成大型甚至超大型矿床。据作者研究,这些基本控制因素是:①有利的区域成矿环境和深部背景;②矿质、流体和热能等充分供应;③成矿系统的结构优化(矿源场、中介场、储矿场的紧凑叠接);④成矿作用的适时启动(温、压突变及流体混合等引起成矿作用的发生);⑤稳定持续的成矿过程,系统有良好的自组织功能,当环境变化干扰成矿时,能及时调节、建立新的匹配关系,维持系统的正常运转,直到形成矿质的最大量富集;⑥成矿后良好的保存条件。作者还按照成矿物质浓集作用和成矿轨迹,提出 3 个基本的成矿系统,即:(a)熔浆成矿系统(含岩浆矿床、伟晶岩矿床、夕卡岩矿床、斑岩矿床等);(b)流体聚敛成矿系统(含沉积矿床、火山—沉积矿床、SEDEX 矿床、浅成低温矿床和热泉型矿床等);(c)原地(近原地)改造成矿系统(含变质矿床、动力改造矿床、热液改造矿床和风化壳型矿床等),每一成矿系统都有其成矿背景、控矿因素和特定作用过程。

成矿作用是一种复杂的动力学过程。矿床成因的基本问题归根到底是成矿作用动力学问题,这是一个全新的研究领域。成矿作用动力学研究成矿作用的速率、机制和过程,包括成矿系统中非线性反馈的动力学机制和自组织功能等。进行这些研究可以使矿床成因研究从静态上升到动态,从定性到定量,从局

部扩大到整个系统,对传统的矿床成因理论将有新的突破,将能逐步建立起新的成矿理论的核心内容。於崇文等(1994)在这个领域中进行了开创性研究,提出了成矿作用动力学的理论体系和研究方法,并通过典型矿床实例作了较详细的剖析。

4 地质流体与成矿作用

近年来对地质流体有一系列新发现,例如:①俄罗斯、德国等大陆科学钻探发现,在深8~12km范围内,仍存在大量自由孔隙流体,它们除少量为深源外,主要是下渗循环的大气降水,流体中金属元素含量高,还有微生物活动迹象;②北美大陆内部盆地—造山带转换过程中,在盆地沉积岩中热卤水运移达数百km,速率达0.1m/a数量级,并控制了密西西比河谷型Pb—Zn矿床的形成,对该区油气藏的分布也有重要影响;③大洋和大陆上现代热泉喷口的大量发现;④大洋钻探结合地质—地球物理研究显示,现代增生楔深部构造滑脱带内存在着大量的富含烃类和金属的活动热流体;⑤在一些大油气田和成矿盆地的深部存在着超压流体房。

这些发现都说明,流体是无处不在,是地质作用中最为活跃的因素。流体的大规模运动必将造成地壳乃至地幔的物质和能量的转换与迁移,因此也就直接导致地球内部化学元素的活动和成岩、成矿作用的发生。正是由于地质流体在地球演化中的特殊重要作用,近年来国际地学界将流体研究作为地学的重要前沿,列为优先研究领域,相继召开了一系列水/岩反应或地质流体为主题的国际学术会议,一些有关的重大研究课题也在逐步实施。其主要内容包括:

4.1 区域流体—成矿系统

以往对成矿流体研究多限于矿田范围,一般是采用矿物包裹体、构造地球化学、矿床水文地球化学等方法,查明流体的组成性状,追踪流体的运移路径,找寻矿质堆积地,以指

导大比例尺成矿预测。随着找矿的区域展开,和上述各种新发现的启示,人们对地质流体作用的认识开阔了,对区域流体成矿的研究已经提到日程。这种大尺度研究对于追溯古成矿流体路径,查明区域成矿分带,进行区域成矿预测有重要意义。由于古成矿流体的运移轨迹多被后来地质作用掩盖或破坏,恢复重建古流体系统的难度很大,需要通过区域性的专门填图,追踪古流体遗迹,恢复其活动路径网络,以建立起区域流体—成矿模型。可以利用的流体示踪标志有:①区域交代蚀变带;②热水沉积岩和热水成因角砾岩带;③火成岩脉及热液矿物脉;④矿物流体包裹体研究;⑤含矿构造的分布;⑥已知矿床和矿点的分布;⑦各类区域地球物理异常,如热水蚀变引起的岩石古地磁和放射性异常等;⑧区域地热梯度异常等。

4.2 现代海底热水成矿研究

现代海底热水成矿系统在大洋中脊、岛弧、弧后扩张盆地、板内火山活动中心、热泉中心及大陆边缘构造带中均有分布,正在形成若干个现代热液矿床。到1993年底止,已发现139处洋底块状硫化物矿床,其中最大的一个矿石储量已达1亿t。而这些矿床只不过是不到1%洋壳表面勘查的结果,说明其具有巨大的潜在的经济价值,将是21世纪矿业开发的新领域。此外,对现代热水成矿机理的深入了解,也可为认识古代VMS型和SEDEX型等热水成矿研究提供重要信息,对现有成矿理论产生重大影响。现代海底成矿观念强调(侯增谦等,1996):①海底成矿作用虽可产于不同环境,但均与张裂断陷事件密切相关,矿床规模和分布特征受张裂速率制约;②成矿物质主体来源于有热水循环的火山—沉积岩和下伏基底岩石;③金属硫化物堆积发生于丘堤—烟囱联合构成体和结壳下部,通过开放空间的硫化物充填和先成矿石的淋滤迁移来实现矿石富集;④热流体基本上呈双扩散对流循环。当前,海底热水成矿

作用是各发达国家竞相研究的领域,我国应抓住契机,及早开展研究,以免在地学研究和未来海底资源开发中处于被动地位。

4.3 有机质流体与成矿作用

含有机质流体成矿作用研究是矿床学和有机地球化学研究的新课题。已知在不少金属矿床的矿物包裹体中含有烃类物质。例如, MVT 型 Pb—Zn 矿床的成矿流体为 H_2O + 有机质(油气); 陕西公馆大型 Hg—Sb 矿床的辰砂晶体包裹体中,发现了含油气的有机质流体; 滇黔桂卡林型 Au 矿的成矿流体中皆含有机质。又据报道,一些油气田中, Au 含量较高,有的重油中含 Au 达 2×10^{-6} (山东胜利油田)。因此,含有机质流体的形成、演化及其对金属元素的活化萃取、输运转移和卸载聚集中所起的作用,已成为引人入胜的研究领域,金属矿床(化)和油气藏常相伴生的原因也需要从对有机质流体的研究中获得科学的解释。近年的研究成果表明,不仅 Fe、Mn、P、Al 等沉积矿床的形成与生物有机质关系异常密切,多数层控型 Au、Pb、Zn、Hg、Sb、As、U 等矿床的成矿流体也富含有机质。据傅家谟等(1986、1990)实验证明,含有机质的水溶液比单纯含无机盐的水溶液中,矿质的溶解度要高得多,可达几倍到十几倍。有机配位基可以与 Pb、Zn 等形成稳定的可溶性金属—有机络合物,它们在水溶液中具有良好的热稳定性(180~240℃)。据张文淮等(1996)研究,滇黔桂区 Au、Hg、Sb、As 矿床的成矿温度多在 200℃ 以上,盐度低(<5%),有机质主要为气态烃类,以 $-CH_3$ 、 $-CH_2$ 、 $C-CH_3$ 等形式存在,说明该区成矿金属除与无机质形成络合物迁移外,更多的可能是与有机质形成气态金属有机络合物迁移。

地质流体成矿的研究问题还很多,不再列举。其发展趋势是,通过对地质流体成矿作用的系统研究,丰富和发展成矿理论,为建立 21 世纪找矿新思维奠定新的理论基础。

5 大型、超大型矿床和矿集区研究

近年来由于找矿难度加大,成本增高,很多勘查单位已将找矿目标集中到寻找大型、超大型矿床和矿化富集区。前者有直接的重大经济效益,后者可作为新的矿产资源基地的后备,并从中找到大型、超大型矿床的希望。因此,对大型、超大型矿床和矿集区的形成条件和找矿方向的研究日益成为矿床学家和勘查学家关注的焦点。现简单谈谈对超大型矿床的研究。

超大型矿床形成是多种有利成矿因素综合作用的结果。涂光炽新近指出(1996),克拉通边缘、铅同位素急变带、地壳厚度急变带和碳酸盐岩系向碎屑岩系过渡带等是超大型金属矿床产出的有利宏观地质背景;而挥发份、碱金属、有机质、黑色岩系、大型构造、同生构造及热水沉积作用等是形成超大型矿床的重要因素。他还明确提出若干超大型矿床类型,如 REE—Fe 矿床、SEDEX Pb—Zn 矿床的时控性、突变性及其与岩石圈演化的密切关系。这些观点是他在主持攀登项目 A—30(与寻找超大型矿床有关的基础研究)研究中获得的部分创新成果,对超大型矿床的找寻工作有深远意义。

构造是控制超大型矿床形成和分布的重要因素,主要的控矿构造类型有:①裂谷类伸展构造及同生断层;②活动陆缘构造—岩浆带,包括火山岛弧带;③大陆内部巨型断裂及其交汇部;④大陆边缘海及大陆架斜坡带;⑤大型沉积盆地和火山盆地;⑥大型韧性剪切带;⑦大型火成岩穹窿;⑧陆壳浅层脆性构造域等。作者曾提出识别大型构造含矿性的 12 种标志,以预测大型、超大型矿床的产出部位。

不同类型流体的大量混合是形成超大型矿床的重要机制,很多矿床的地质和稳定同位素研究证明了这一论断。在对奥林匹克坝矿床的成因研究中, D. W. Haynes (1995) 又

提出了新的混合流体成矿模式,即在中元古宙克拉通边缘构造活动带中,火山—侵入活动显著,有大规模地热异常存在,地表有古盐湖,火山喷发和破碎构造带沟通了下渗卤水和上涌的深部流体,在两种流体大量混合的地带形成了U、Cu、REE等金属的巨量富集,构成举世瞩目的世界级矿床。该模式提出者指出,热流体的活化萃取矿质和在角砾杂岩带中的停集是成矿的根本原因,而不一定必要有矿源岩的预富集。

超大型矿床的成因复杂,一般从以下几方面加以探索:一定时空域中成矿因素的最佳匹配;多重分异富集成矿;先期成矿与后期成矿在同一空间中的叠加成矿作用;特定地球化学省的有利矿源条件;成矿的全球背景和重大地质事件等。这几个方面的观点不是矛盾的,都从不同的角度来试图说明超大型矿床的成因。关键是针对一定区域中一定类型的超大型矿床,作出科学的成因解释,以便对实际勘查工作有所帮助。

以上讨论了成矿地质背景、成矿作用演化、成矿系统和成矿作用动力学、地质流体与成矿,以及超大型矿床成矿条件等5个成矿学的基本问题。作者认为,这5个方面都是富有生命力的研究领域,对它们的深入研究,可

以带动整个矿床学的进步。5个方面研究工作和成果的互相渗透融通,将构成21世纪上半世纪新的成矿学理论基础,并对勘查工作起重大影响。在21世纪可持续发展过程中,对很多国家和地区来说,矿产资源的勘查和研究,仍将占有重要的地位,矿床学将得到进一步发展和提高的良好前景是可以预期的。

参考文献

- 1 於崇文. 成矿作用动力学. 地学前缘, 1994, 1(3).
- 2 侯增谦, 莫宣学. 现代海底热液成矿作用研究现状及发展方向. 地学前缘, 1996, 3(4).
- 3 涂光中. 超大型矿床的探索与研究的若干进展. 地学前缘, 1994, 1(2).
- 4 张文浩等. 成矿流体及成矿机制. 地学前缘, 1996, 3(4).
- 5 傅家谟等. 有机质演化对金属元素迁移和富集的控制作用(基金项目科研总结). 中国科学院有机地球化学开放实验室, 1986, 1990.
- 6 甄吉生. 矿床地质学的发展前景和思维方法. 地学前缘, 1994, 1(3).
- 7 甄吉生. 关于构造—流体—成矿作用研究的几个问题. 地学前缘, 1996, 3(4).
- 8 戴自希. 全球超大型金属矿床(区). 中国地质矿产信息研究院编著,《迈向21世纪的地学与矿产资源》. 北京:地质出版社, 1996.
- 9 Haynes D W. Olympic Dam Ore Genesis: A Fluid—Mixing Model. Economic Geology, 1995, V. 90 pp. 281—307.

PROGRESSES ON METALLIZATION RESEARCH

Zhai Yusheng

Abstract Progresses on the research of metallic ore deposits at home and abroad for latest ten years have been presented. They are metallogenic geological and deep setting, ore deposits, metallogenic belts and globe metallogenic evolution, ore-forming system and dynamics, geofluids and metallization, and superlarge ore deposits and so on. To above-mentioned five aspects, their research significance and progresses are introduced respectively, and then their research prospects in future are predicted. It is believed by the author that making a systematic research of above-mentioned five aspects will produce new metallogenic theories in the first half of the 21st century, which will put a great influence on metallic ore prospecting.

Key words metallogeny, geological setting, metallogenic evolution, ore forming system, geofluids, superlarge mineral deposits