

黄沙坪铅锌多金属矿床 成矿机理与成矿预测研究

刘悟辉 戴塔根 徐文炳 著

常州大学图书馆
藏书章

铅锌

Pb&Zn



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

黄沙坪铅锌多金属矿床成矿机理与成矿预测研究/刘悟辉等著.
—长沙:中南大学出版社,2010
ISBN 978-7-5487-0000-5

I. 黄... II. 刘... III. ①铅锌矿床:多金属矿床—成矿规律—
研究②铅锌矿床:多金属矿床—成矿预测—研究 IV. P618.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 013421 号

黄沙坪铅锌多金属矿床成矿机理与成矿预测研究

刘悟辉 戴塔根 徐文妍 著

☐责任编辑 胡业民

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙市宏发印刷厂

☐开 本 720 × 1000 1/16 ☐印张 11.75 ☐字数 227 千字

☐版 次 2010 年 12 月第 1 版 ☐2010 年 12 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 0000 - 5

☐定 价 29.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

本书在充分分析和综合前人工作成果的基础上,针对前人研究中存在的问题,以宏观地质为基础,重点从前人研究的较为薄弱的热力学计算、同位素分布及演化特征、微量元素分布及演化特征入手,以多因复成成矿理论为指导,对矿床的物质来源、矿床成因、矿床的成矿作用以及矿床定位预测作了许多新的尝试,取得了一些有别于前人的地质认识,并对矿区的成矿控制作用、矿床找矿模型提出了自己的认识,这些认识对指导边深部找矿具有重要的实践价值,创新性的主要成果和认识如下:

(1)通过前人研究成果及认识,总结了区域成矿地质构造背景;并通过对比研究水口山、东坡、瑶岗仙、黄沙坪、香花岭五大矿田的区域构造特征、区域地球化学异常特征以及区域重磁异常特征,总结了湖南大型矿床产出的构造及重磁、化探异常特征的典型特点。

(2)从地质特征、岩石学特征、岩石化学特征、微量元素及稀土元素地球化学特征对本区的岩浆的来源、成岩机制以及演化特征进行了详尽的研究,得出矿区的成矿岩体的形成具有多源、多因、多阶段特点的新认识。

(3)用挥发作用、混合作用、水岩交换作用模型考查碳酸盐岩的碳氧同位素变化原因,获得雨水+岩浆流体混合再与碳酸盐岩发生同位素交换作用的模式,对矿区实际的碳氧同位素变化作出了很好的解释;用二组正常铅、短期内形成的异常、两阶段异常铅和简单三阶段异常铅等模式考察矿区铅同位素组成,获得两阶段异常铅模式可以很好解释矿区的铅同位素组成;用同位素平衡系数外推法获得两组 $\delta_{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 值,两组 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 值表明热液中硫可能有岩浆和沉积地层两种来源。

(4)首次通过成矿物理化学环境研究,获得矽卡岩成矿温度为 $430 \sim 570^{\circ}\text{C}$; 成矿压力约为 $1000 \times 10^5 \text{ Pa}$; x_{CO_2} 在 $0.01 \sim 0.22$ 之间,还得出早期矽卡岩成岩流体温度较高,且有较高的 x_{CO_2} (或碳酸盐岩)参加成岩活动;由于流体温度下降和 H_2O 参与活动,使得晚期矽卡岩成岩流体温度下降, x_{CO_2} 下降;硫化物阶段成矿压力为 $0.9 \times 10^5 \sim 300 \times 10^5 \text{ Pa}$, 盐度为 $13.9\% \sim 34\%$, 成矿温度为 $200 \sim 350^{\circ}\text{C}$, 并还获得各个阶段的硫、氧和二氧化碳逸度值及 pH 值。

(5)通过获得硫化物阶段温度、氧逸度、硫逸度、pH 值和矿物包裹体的盐度,计算出硫化物成矿时金属元素的搬运形式,并得出第一阶段铜、锌和第二阶段铅、锌、银的搬运形式,主要以氯络合物为主,氢羟基络合物和硫化氢络合物次

之；第二阶段确是 HTe^- 、 HTeO_3^- 、 H_2TeO_3 搬运为主。

(6)通过对黄沙坪铅锌多金属矿床地质特征、成矿地质条件、成矿作用、控矿因素、地球化学特征以及成矿过程的分析，认为成矿物质主要来源于花岗质岩浆，部分来源于地层，成矿流体为燕山早期岩浆水与加热地下水组成的混合流体，矿床的形成经历了地台阶段的沉积成矿阶段、沉积成岩成矿阶段和地洼阶段的岩浆热液成矿阶段，在此基础上，建立了黄沙坪铅锌多金属矿床的成矿模式。

(7)在对黄沙坪铅锌多金属矿床的关键控矿因素综合分析的基础上，对岩体、构造、地层多因素耦合成矿定位机制及其具体的矿床、矿体定位规律进行了综合研究和分析。

(8)针对具体的找矿预测靶区，结合矿床空间定位规律的综合分析以及构造地球化学和三频激电的勘查成果，对预测区找矿前景进行了分析，圈定了优选的异常区段，总结了找矿标志，建立了适合本区的综合找矿模型。

作者
2010 年 11 月

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 成矿理论研究现状	(2)
1.1.1 层控矿床	(2)
1.1.2 成矿流体	(4)
1.1.3 成矿系统	(5)
1.1.4 成矿模型	(7)
1.1.5 找矿方法	(10)
1.2 黄沙坪矿田研究进展	(15)
第2章 区域成矿地质背景	(19)
2.1 沉积建造	(19)
2.2 区域构造特征	(19)
2.3 岩浆岩建造	(21)
2.4 大地构造位置及地壳演化特征	(26)
2.5 区域地球化学特征	(30)
2.6 区域地球物理特征	(31)
2.6.1 重力异常特征	(31)
2.6.2 航磁异常特征	(32)
2.6.3 重磁异常特征	(33)
第3章 成矿地质条件分析	(34)
3.1 矿区地层及其与成矿关系	(34)
3.1.1 矿区地层	(34)
3.1.2 地层层位与成矿	(35)
3.1.3 地层的含矿性	(37)
3.2 矿区构造及其与成矿关系	(38)
3.2.1 矿区构造	(38)
3.2.2 构造与成矿分析	(40)
3.2.3 构造对矿床的控制	(42)

3.3 岩浆岩与成矿关系	(44)
3.3.1 岩石学特征	(44)
3.3.2 岩石化学特征	(47)
3.3.3 微量元素地球化学特征	(49)
3.3.4 稀土元素地球化学特征	(51)
3.3.5 岩体的演化特征	(52)
3.3.6 岩浆岩的成因机制	(54)
3.3.7 岩浆岩与成矿关系	(58)
第4章 矿床地质特征	(61)
4.1 矿体形态、规模及赋存部位	(61)
4.2 矿石矿物组成及其共生组合	(61)
4.3 矿石结构构造特征	(66)
4.3.1 反映沉积成岩期—热液改造的结构构造	(66)
4.3.2 热液作用下形成的结构	(66)
4.3.3 矿石构造	(67)
4.4 围岩蚀变	(68)
4.4.1 围岩蚀变类型	(68)
4.4.2 围岩蚀变的分布	(70)
4.4.3 围岩蚀变的先后顺序	(71)
4.5 标型矿物特征	(71)
4.5.1 黄铁矿	(71)
4.5.2 闪锌矿	(77)
4.5.3 方铅矿	(80)
4.6 成矿期及成矿阶段	(84)
4.6.1 成矿阶段的划分	(84)
4.6.2 矿物生成顺序	(85)
4.7 矿化分带	(87)
第5章 成矿作用的热力学研究	(88)
5.1 热力学原理	(88)
5.1.1 化学平衡常数计算	(88)
5.1.2 摩尔分数计算	(89)
5.1.3 道尔顿分压定律	(89)
5.1.4 亨利定律	(90)

5.2 矿物包裹体阳离子比值温度计	(90)
5.2.1 K/Na 原子比温度计	(90)
5.2.2 K - Na - Ca 温度计	(91)
5.3 分压(逸度)确定方法	(91)
5.3.1 一般分压确定方法	(91)
5.3.2 f_{O_2} 的确定方法	(92)
5.3.3 f_{S_2} 的确定方法	(93)
5.4 pH 值的计算	(93)
5.4.1 $HCO_3^- - CO_3^{2-}$ 法	(93)
5.4.2 绢云母确定法	(94)
5.4.3 叶蜡石和斜绿石确定法	(94)
5.4.4 方解石确定法	(95)
5.4.5 $CO_2 - H_2O - NaCl$ 确定法	(96)
5.5 金属元素溶解度计算	(97)
5.6 矿物包裹体中水溶气体成分的物理化学参数图解	(98)
5.6.1 图解准备	(98)
5.6.2 图解设计	(100)
5.7 矽卡岩形成的物理化学条件分析	(105)
5.7.1 矽卡岩热力学计算相关理论	(105)
5.7.2 矽卡岩形成的压力估算	(108)
5.7.3 $p - T - x_{CO_2}$ 条件	(108)
5.7.4 氧逸度环境	(109)
5.8 硫化物形成的物理化学条件分析	(111)
5.8.1 温度	(111)
5.8.2 硫化物形成的压力估算	(113)
5.8.3 硫化物期第 1 阶段的物理化学条件	(114)
5.8.4 硫化物期第 2 阶段的物理化学条件	(118)
5.8.5 第 3 阶段物理化学条件	(120)
5.9 $\alpha \Sigma Cu$ 、 $\alpha \Sigma Zn$ 、 $\alpha \Sigma Pb$ 、 $\alpha \Sigma Ag$ 、和 $\alpha \Sigma Te$ 参数的计算	(120)
第 6 章 同位素地球化学研究	(126)
6.1 碳氧同位素	(126)
6.1.1 矿区碳、氧同位素特征	(126)
6.1.2 方解石脉的碳氧同位素组成	(127)
6.1.3 碳、氧同位素形成机制	(127)

6.2 硫同位素	(130)
6.2.1 地层的黄铁矿的硫同位素组成	(130)
6.2.2 矿床硫化物的硫同位素组成	(130)
6.3 成矿流体 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 组成	(133)
6.4 铅同位素	(134)
6.4.1 两种正常铅的混合	(134)
6.4.2 两阶段异常铅	(138)
6.4.3 短期内形成的异常铅	(143)
6.4.4 简单三阶段异常铅	(144)
6.5 氢氧同位素	(149)
第7章 矿床成因、成矿模式及其定位规律	(150)
7.1 矿床成因	(150)
7.2 成矿模式	(151)
7.3 矿体定位规律及其控制因素	(152)
7.3.1 矿体定位的基本规律	(152)
7.3.2 应力阴影构造与矿体定位	(155)
7.3.3 断裂构造与矿体定位	(156)
7.3.4 岩体-构造-地层耦合作用与矿体定位	(156)
7.4 找矿标志	(158)
第8章 预测区隐伏矿综合预测	(160)
8.1 预测区地质概况及找矿信息分析	(160)
8.1.1 预测区地质概况	(161)
8.1.2 预测区找矿地质信息分析	(161)
8.2 预测区三频激电找矿预测研究	(162)
8.2.1 致矿异常识别标志	(162)
8.2.2 三频激电扫面异常分析	(162)
8.2.3 三频激电测深资料分析	(168)
8.2.4 三频激电异常成果综合分析	(168)
8.3 测区构造地球化学找矿预测研究	(169)
8.4 隐伏矿综合定位预测	(171)
8.4.1 预测依据及其评述	(171)
8.4.2 隐伏矿综合定位预测	(172)
参考文献	(173)

第1章 绪论

矿产资源是自然界不可再生的重要物质资源,它是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础,即使在人类进入信息社会和知识经济时代的今天,70%的农业生产资料与矿产资源有关,80%以上的工业原料取自矿产资源,95%左右的能源为矿物能源(朱训等,1999)。根据20世纪世界各发达国家经济发展的规律,一个国家进入并实现工业化的过程是矿产资源消耗快速增长的时期。我国自改革开放以来,尤其是20世纪90年代以来已进入工业化快速发展阶段,因此,保证矿产资源稳定地可持续供应是实现我国第三步发展战略目标不可缺少的物质基础。

据统计,原有色金属工业总公司直属的194座大型矿山在“七五”和“八五”期间已有73座关闭,加上1999年经国家经贸委批准关闭的47座,近15年来矿山闭坑总数比例高达62%。预计到2010年县级以上911座矿山约有一半要关闭,10种有色金属矿山的生产能力消失量占实际总生产能力的13%~72%,平均达40%左右。估计到2020年仅仅有不足20%的矿山能够维持生产。

湖南省素有“有色金属之乡”的美称。特别是铅锌矿床在湖南分布广、类型多、储量大、开发早,湘南地区一直是我国南方有色金属铅锌的重要产地,如水口山、宝山、黄沙坪、东坡和香花岭。然而,这些矿山经过数十年到上百年的开采,都面临着储备资源不足与危机的问题,寻找和发现新的、隐伏的接替资源是振兴我国矿业的关键之一。

黄沙坪铅锌矿是一个老矿山,其开发利用始于唐朝,盛采于明朝和清朝,留下的老窿有的深达百余米,估计已采矿石多达百余万吨,建国以来由于当时国民经济建设所需,经过大规模的开采,目前保有储量已不到十年,急需找到接替资源。建矿以来,先后有多支地质队长期在此工作,有数十家研究单位、高等院校对此进行过大量的科学研究,他们详细研究了黄沙坪矿区的地、物、化特征,各种控岩控矿规律及找矿方向。因此,浅部和地表出露的易找矿体已基本勘查完毕。潜在的资源只可能是一些难发现的、难识别的和不符合已有经验成矿模式和找矿模型的边、深部的隐伏矿体。在此情况下,要取得大的找矿成果,如何应用国内外先进的成矿理论、技术和找矿成功经验来开展找矿工作就显得尤为重要。

不容置疑,任何先进的找矿技术和方法的应用都必须有先进的地质成矿理论的指导和支撑(毛景文等,1998)。成矿理论的作用主要在于:①建立正确的找矿思路,指导找矿工作的部署,即到什么地方去寻找什么矿床;②建立理论的成矿

模式,指导找矿信息的解释,这对于在已有相当工作基础的老矿区和大型矿集区来说是相当重要的。

黄沙坪矿区一直是科研院所的研究“热点”,做了大量富有成效的工作,积累了丰富的实际资料和测试数据,并在许多方面取得了丰硕成果,已将浅部和出露地表的易找矿产资源勘查完毕,且难于寻找到新的矿产资源。现有保有储量严重不足,急需找到潜在或替代资源。如何在前人的有关矿床成因的共识(a.矿床与燕山期多次浅成和超浅成中酸性岩浆活动密切相关,以岩体为中心形成有斑岩型、矽卡岩型和中、低温热液型的钨钼铜铅锌银一系列类型的矿体;b.矿体和成矿岩体都受以逆冲断层为主体的构造控制)基础上,借鉴目前国内外许多新的找矿理论和成功的找矿经验,彻底突破传统理论的束缚,从矿床形成的实质上认识黄沙坪铅锌多金属矿床的形成条件与形成过程,实事求是地确定该矿的理论找矿模型,多、快、好、省地找到一些难发现的、难识别的和不符合已有经验成矿模式和找矿模型的边、深部的隐伏矿体。本书试图对当前矿业界所重点关注的热点问题作有益的探索,其对资源危机矿山的二轮找矿及成矿学领域都具有极其重要的现实和理论意义。

1.1 成矿理论研究现状

人口、资源与环境是人类社会所面临的共同问题。20世纪60年代以后,找矿难度越来越大,而人类对各种矿产资源的需求量却日益增大,隐伏矿床预测已成为世界各国找矿工作所面临的难题。21世纪将是知识经济时代,经济和社会的可持续发展将越来越多地依赖于知识创新和创新知识的应用,以解决日趋严重的资源及环境问题。矿床研究和勘查要取得重大突破,也必须依赖于科学技术的进步,依赖于成矿理论及研究方法的创新。鉴于此,近20年来,国内外许多地质学家在成矿规律和成矿预测方面进行了不懈的探索和努力,出现了多学科参与、新理论、新方法辈出的百花争艳局面,成功地预测和发现了一些隐伏矿床。为了讨论的方便,可将成矿规律和成矿预测这一重要领域的成就分为如下的若干方面。

1.1.1 层控矿床

层控矿床(Strata-bound deposits)是20世纪50年代以后迅速兴起的一种矿床形成作用和成矿理论,它的产生和发展使过去流行的传统一元成矿论发展为成矿作用的“多物质来源、多成矿阶段、多成矿作用、多成因类型和多控矿因素”(陈国达,1982,1992,2000;彭省临等,1991,1992)的多因复成成矿论时期。层控矿床将几百年来矿床学界的水成—火成、内生—外生、共生—后生的激烈对立和争论在一定程度上统一起来了,促进了矿床形成理论和矿床地球学科向纵深发

展(涂光炽, 1979, 1984; 吴延之, 1979, 1985; 胡受奚, 1983), 也给找矿勘探工作带来了新的方向、前景和标志。

层控矿床概念的建立和发展, 经过了曲折的路程。自18世纪“火成论”和“水成论”之争被火成论占据上风之后, 成矿理论问题似乎基本上解决。但是, 按照岩浆—热液理论去实施找矿, 往往不能取得预期效果。20世纪30年代, 德国慕尼黑大学的A·毛赫(Albert Maucher)认为德国巴伐利亚一带的变质多金属硫化物矿床受地层控制。从20世纪50年代起, A·毛赫及其学生对阿尔卑斯和土耳其地区碳酸盐岩层中的层状铅锌矿床进行了详细研究, 得出了矿石是在沉积建造中富集的结论, 并将这些矿化特点概括在“层控”这一概念中。20世纪60年代初, A·毛赫等又发起了一项对欧洲古生代地层中的层状Sb—Hg—W矿床的研究计划, 并于1967年在奥地利的弗尔伯塔发现大型白钨矿。从此, 层控和层控矿床的概念在国际地质界迅速而广泛地流传开来。与此同时, H·金和E·奥德里斯科尔特提出大量硫化物矿床的矿质富集是在地表上进行的。进入20世纪70年代, 层控理论有了长足进步, 1971年H·金在《澳大利亚人对成矿问题的一些与传统观点相反的想法》中指出: 在澳大利亚迄今为止所发现的重要产地, 几乎全部(Au和铝土矿除外)是层状的……全部构成有重要价值或主要的矿床(其中大多数为硫化物矿床或硫化物伴生矿床)均产生待定的岩层或待定的层位。同年, K·B·克劳斯科夫提出了沉积—演化的观点。1972年, A·毛赫在《时控和层控矿床与地球的演化》的论文中, 系统地总结了研究层控矿床的经验, 给正在迅速发展的层控理论以新的推动力。随着10大卷《Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits》(Wolf, 1976—1981)和3大卷《中国层控矿床地球化学》(涂光炽等, 1984, 1987, 1988)的相继出版, 标志着国内外层控矿床的研究达到高峰。

在对若干层控矿床认识的过程中, 内生与外生、同生与后生、浅成与深成的争论常常交替出现。在层控矿床形成的概念中, 实际上融合了内生与外生, 而同生与后生看似相互排斥, 实则相辅相成。事实上, 至少在部分层控矿床中, 内生与外生、同生与后生都可能在矿床形成的一定阶段或在一定部位起作用。例如, 作为层控矿床最简单的实例——砂岩铜矿, 在它早期的沉积阶段就已有矿化, 但不一定成矿, 而成矿常发生于后期的构造错动及活化, 其实际上就融同生与后生、外生(沉积成岩)与内生(构造改造)两种作用于一体。

G·C·阿姆斯固茨认为: “在达尔文进化论发表百年后, 矿床学者只是到现在才发现了自己的进化论。将矿石和它的地质环境——围岩联系起来观察研究, 对矿石的成因持变化和发展的观点, 矿床学只是到现在才对解救危难的上帝(花岗岩)失去了信仰”。

的确, 层控矿床的形成不是偶然地孤立存在的地质现象, 而是时间上、空间上地球物质运动不平衡发展的必然结果。层控矿床一般明显受地层、岩相和构造

的控制。构造环境从大范围来讲可以控制层控矿床在区域上的时间、空间展布规律,从小范围来讲又控制着层控矿床类型、矿床变形及矿体的形状、产状、后生变化。

“层控矿床”理论与陈国达的“地洼递进成矿理论”都强调矿床形成过程中的继承性和递进性,因而都要求从多元成矿的角度来考虑矿床的形成,这种“多元”的思维对于同时具有内生和外生特点的隐伏矿床(体)的定位预测具有十分重要的意义。

1.1.2 成矿流体

Fyfe 等(1978)所著的《地壳中的流体》书中,认为地质过程中流体所起的作用及其所扮演的角色是近年来地球科学研究的一个重要前沿课题,并系统总结了20世纪80年代以前有关流体地质作用研究的成果。20世纪80年代以后,对地质流体的研究更加深入,内容涉及构造作用中的地质流体、造山带中的流体作用、区域变质作用中的流体动力学、水-岩反应等。20世纪90年代以来,人们对俯冲带、剪切带中的流体作用、盆地流体、海底及大陆热泉、成矿流体、油气的形成及运移、火山活动及地震等进行了大量研究,尤其是对地质流体运移过程及动力学研究推动了该领域的深化(张连昌等,2001)。

成矿流体是具有高温高压、含有一定盐度和矿质的高能量热流体,因而具有很强的活动性。一般来说,流体的运移往往是一种方式为主、几种方式共存,并伴随着复杂的地球化学反应。控制成矿流体运移方式和驱动成矿流体运移的动力因素是流体自身的性质(热力学条件),如温度、压力、 E_h 、 pH 、盐度、密度、成分、不混溶作用等(M Person and G A Garven, 1994);环境(动力学条件),如渗透性、地热系统、构造应力、流体通道宽度等;流体-环境相互作用,如流体混合、沸腾作用、水-岩反应等(D Craw, 1992; D W Haynes 等, 1995)。张文淮等(1996)和肖荣阁等(2001)分别对成矿流体的分类做过研究,张文淮等(1996)认为金属矿床的成矿机制为:不同种类流体混合;单一流体不混溶;盐水体系中有有机质的参与;水-岩交换;物-化条件改变。张连昌等(2001)认为流体运移和演化方向的突然改变可能预示成矿作用的发生。

大量证据表明,许多大型、超大型矿床的形成是地壳大规模流体流动的结果。如江南地区中-低温热液矿床的形成(马东升, 1997);美国密西西比河谷型铅锌矿床的形成和分布与盆地内大规模流体的流动有关;卡林型金矿产于以沉积岩为主的地体中,是地壳拉伸作用导致区域流体发生循环的结果(Rober 等, 1997)。Philips G N 等(1998)通过对澳大利亚 Kalgoorlie 巨型金矿床的形成因素研究后认为,形成巨型矿床应有优越的成矿系统:高的热流、大规模流体库、主构造通道、有效的流体聚集及范围大而有利于成矿的容矿岩石,即大规模流体的

存在是巨型矿床形成的必要条件。另有研究表明,地幔流体和地幔交代作用的存在对一些大型矿床的形成产生影响,如曹荣龙(1994)认为内蒙古白云鄂博矿是一个国内外罕见的地幔流体交代矿床和新疆旦旦布拉克超大型蛭石矿是地幔流体交代成因的非金属矿。

成矿流体地球化学是当前国际地学界研究的前沿和热点之一,成矿流体活动的地球化学示踪(同位素地球化学示踪、元素地球化学示踪、包裹体地球化学示踪、稀有气体地球化学示踪)研究已成为一个新的趋势(倪师军等,1999),通过流体来源示踪、运移示踪和定位可以捕捉流体运移演化的标志,确定流体运移的通道,并将成矿流体动力学、流体演化的非线性过程及地球化学自组织理论与局部地质热异常结合起来,恢复、再造和反演古流体系统,进而查明流体活动的全过程。根据流体的运移演化与成矿的关系,确定成矿过程,并进行成矿预测(张连昌等,2001)。

超临界流体(Supercritical fluids)是一种温度高于临界温度的流体,其性质介于流体和气体之间,在临界温度以上,气液具有相同的密度,增压不能使流体液化(刘伟,2003)。超临界成矿流体来源、超临界成矿流体在热液矿床中的时空分布与定位、超临界成矿流体溶解度等问题是认识热液成矿作用的新课题。於崇文(1999)指出:超临界溶解度的渐近短程临界反应和临界过程涨落对超临界流体的热力学与传输性质的非渐近长程临界效应相结合对成矿作用将产生极其重要的影响。涂光炽(2000)认为有的矿产超常堆积可能与超临界流体的活动有关。超临界地质流体的萃取、层析、分离作用将使成矿元素高度浓集和成矿元素共生组合高度多样化,并使成矿作用的多阶段演化和空间上的分带性发展,导致多矿种和大矿量的大型矿床和矿集区的形成。如智利某斑岩铜矿床铜的储量达6000多万吨,这一巨量的金属堆积并非由漫长的地质过程完成,可能是由一种强有力的流体—超临界流体一次性搬运完成的。有的矿区具有强烈的蚀变,也非弱溶液与围岩反应的结果,可能是超临界流体—岩石蚀变反应的产物。

1.1.3 成矿系统

长期以来,矿床研究的重点主要是矿体及其附近围岩。通过对控制矿床的相关地质因素,即地(岩)层、构造、岩石、矿物和地球化学等特征的描述和总结,探讨矿床的成因与形成过程,从而得出相应的理论、假说或模型(贾跃明,1996)。矿床学发展到今天,单纯地以矿论矿的研究方法已不能适应矿床学发展的需要(翟裕生,1999)。而成矿系统概念的提出,不仅是系统科学方法在矿床学研究中的一种创新性应用,而且也给矿床学的研究注入了活力,体现了现代矿床学向系统化、全球化发展的一种趋势。

成矿系统(翟裕生,1999,2000;朱创业,2000)是指在一定地质时、空域中,

控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿作用过程,以及所形成的矿床系列和异常系列构成的整体,是具有成矿功能的一个自然系统。它主要从成矿要素、成矿作用过程、成矿作用动力学去研究成矿的总体特征,包括矿床组合及有关地质异常形成的原理。这种整体性、全方位思维大大加深了矿山的深、边部隐伏矿体进行综合定位预测的研究和实践。

成矿系统是近年来逐渐被人们认识并关注的一个新概念。中国学者对成矿系统进行了不少开创性的研究。程裕淇先生倡导的成矿系列(程裕淇等,1979,1983;陈毓川等,1993,1998)的理论,是指在一定地质时期和一定的地质环境中,在一定的主导地质成矿作用下形成的,时间、空间和成因上有密切联系,但其具体生成条件有差别的一组矿床类型的组合,它蕴藏着系统科学的一些原则和合理因素,对于同一成矿区带中各种有成因联系的不同的矿床类型的隐伏矿体定位预测具有重要的指导意义。李人澍(1996)在其专著《成矿系统分析的理论与实践》中,建立了成矿系统框架,对成矿系统的研究方法进行了初步总结,并以陕西秦巴地区为例进行了区域含矿性评价和成矿预测,探索了成矿研究的新途径。於崇文(1997,1998)从成矿作用动力学的角度对成矿系统的形成过程和机理作了深入分析。与此同时,一些学者也运用成矿系统的概念进行了不同系统层次的研究。如流体成矿系统与成矿作用研究(贾跃明,1996)、古大陆边缘构造演化和成矿系统(翟裕生,1998)、幔柱构造与成矿系统(侯增谦等,1998)、剪切带构造成矿系统(邓军,1998)、Sedex型矿床成矿系统(韩发,1999)、变质岩区金矿成矿系统(肖荣阁,1999)和生物成矿系统理论(殷鸿福,1999)。

成矿系统具有自组织性、自相似性和形成过程的振荡性,因此任何一个成矿系统均可看作为开放的、远离平衡的、时空上延展的动力学过程。目前,对成矿系统的认识主要有4种。①以成矿作用主线建立成矿系统,反映在以往的中外矿床学教科书中,如近期的矿床学分类仍然沿用正岩浆矿床、岩浆-气液矿床、伟晶岩矿床、汽化-热液矿床、侧分泌矿床、风化矿床、沉积矿床、变质矿床和叠生矿床等。其实矿床形成的时空延展性就决定成矿作用往往是非单一的,有时是很复杂的过程或叠加过程。②以成岩作用和成矿环境为主线建立成矿系统,反映在程裕淇和陈毓川等(1979,1983)的成矿系列中。例如划分出与岩浆作用有关的、与沉积成岩有关的和与变质作用有关的成矿系列。③以板块构造和岩石为主线建立成矿系统,反映在Guilbert等(1986)编著的《金属矿床地质》教科书中。共列述12类主要金属矿床:与镁铁质火成岩有关的矿床;与洋壳有关的矿床;与中性-长英质侵入岩有关的矿床;与陆相火山作用有关的矿床;与海相火山作用有关的矿床;与海相火山作用和沉积作用有关的矿床;与化学沉积作用有关的矿床;与碎屑沉积作用有关的矿床;与风化作用有关的矿床;与区域变质作用有关的矿床;与溶解-再活化有关的矿床;与火成作用没有联系的后生矿床。④以成矿流

体为主线建立成矿系统,反映在芮宗瑶等(2002)系列论文中。芮宗瑶等(2002)认为,许多金属矿床形成是成矿流体不混溶、沉淀、交代、充填、溶解等过程的结果,并由此推出10种成矿系统:镁铁质岩浆中的堆积系统、镁铁质岩浆与硫化物熔融体不混溶系统、花岗质岩浆与挥发相不混溶系统、热水中矿物子相析出系统、热水与 CO_2 不混溶系统、热水与烃类不混溶系统、变质热水矿物子相析出系统、地下水矿物子相析出系统、地表水中堆积系统和地表水中矿物子相溶解系统等。

如何运用成矿系统的基本概念及其研究方法来说认识成矿规律,指导成矿预测,已成为国内外矿床地质学研究的一个前沿课题,相信在不久的将来,成矿系统的研究将会取得突破性的进展,给矿床学的发展带来深远的影响。

1.1.4 成矿模型

自艾孟斯(1924)提出围绕花岗岩矿床地热分带的认识、斯米尔诺夫(1937)提出硫化物矿床氧化带的矿化分带规律和捷克(1962)提出作为描述一组类似矿床基本特征的成矿模型(Metallogenic model)名词以来,矿床学家就开始研究某个矿床或某一组类似矿床的(物理、化学和地质的)基本特征,并称之为成矿模型。从其研究的内容看,模型理论与方法有侧重于矿床成因的矿床成因模型和侧重于找矿的物理-化学-地质模型。

20世纪60年代末期前苏联地质学家开始了找矿的物理-化学-地质模型研究。70年代中期以来,前苏联的地球物理工作者在乌拉尔和阿尔泰矿区做了大量工作,先后提出了铁矿床、内生稀有金属矿床、含铜黄铁矿床、硫化铜镍矿床、斑岩铜矿床及铅锌矿床的地质、地球物理、地球化学模型。至今,前苏联研究的模型很多,有地质成因模型、分类-标志模型、同等要素组合模型(地质-地球物理模型、物理-地质模型、几何化模型)、地质-工业定量模型、形态模型、富集模型以及多因素模型等(池三川,1988)。但欧美直到1979年,在一次来自北美生产部门和美国、加拿大地质调查所的地质人员参加的资源评价研讨会上,生产部门的地质人员才介绍了这一方法(Cox, 1993)。然而系统的专著性成果则主要见诸于20世纪80年代,短短的几年中,美国、加拿大和前苏联几乎是不约而同地出版了一系列专著。其中,最引人注目、涉及面广、总结性强的著作要算美国地质调查所Cox和Singer(1986)合写的《矿床模式》(Mineral Deposit Models)。它以全球近4000个矿床研究素材为基础,给出了87个矿床描述性模型和60个品位与吨位模式。1992年,美国地质调查所又出版了由Bliss编著的《Developments in Mineral Deposit Modeling》,它是对前一本专著的补充或续篇。加拿大地质调查所也于1993年出版了由Kirham等主编的《Mineral Deposit Modeling》,并于1995年以专著形式出版《Canadian Mineral Deposit Types》(Eckstrand, 1995)。上述四本

专著反映了西方国家当前有关矿床模型方面的最高水平。我国陈毓川、朱裕生等(1993)也出版了主要针对金属矿床的《中国矿床成矿模式》专著。

所谓成矿模型(或矿床模型)就其实质而言,就是在地质找矿实践的基础上,运用先进的成矿理论作指导,来收集、分析和研究与成矿有关的各类信息,从而总结出最客观的认识、最主要的控矿要素和最有利的找矿标志,最大可能地减少找矿的风险性,达到找矿预测目的的一种方法。它随着成矿理论水平的提高和成矿规律的深入研究而发展和改变。

由于成矿模式找矿是理论与实践相结合的产物,因而得到了理论界与勘查界的一致认可。作为类比找矿的标准与知识模型,成矿模型详尽而精细地刻划了包括成矿物质来源、成矿作用等成矿的全部过程,它在矿床学理论与找矿预测领域具有无法取代的重要地位。因此,世界各国都充分开展了模型找矿,并取得了可喜的成果,如著名的斑岩型成矿模式、卡林型金矿成矿模式、块状硫化物成矿模式及我国的蚀变岩型金矿成矿模式、玢岩铁矿成矿模式等找矿效果为国内外矿业界所震惊。美国根据圣马纽埃矿床建立的斑岩铜矿蚀变分带模型,成功地发现了隐伏的卡拉马祖斑岩铜矿床。加拿大直布罗陀斑岩铜矿床、墨西哥拉卡里达德斑岩铜矿床、葡萄牙内维斯—科尔沃铜矿床以及澳大利亚奥林匹克坝铜矿床(Haynes D W, Cross K C, Bill R T, et al, 1995)也都是根据已有的成矿模型找到的大型—超大型矿床。成矿模式在回顾已知、预测未知方面均起了重要作用。

我国的地学专家从20世纪80年代以来,也开始探索模型找矿(徐兴旺等,2000),并有不少成功的例子。彭程电(1986)根据岩舌下凹兜成矿模型新发现了老厂矿田双竹矿床;姚金炎(1990)根据长坡矿床的矿体类型与分带模型,推断并发现了大福楼锡矿床;赵玉琛(1990)根据凹山铁矿“三部八式”的成矿模型,在南山铁矿深部发现了8000万吨凹山式铁矿,在火山基底抬升断块下部预测并发现厚30 m的凤凰山式铁矿,预测和发现新的雍镇矿田;戴福盛(1990)据云龙锡矿床“三层楼”成矿模型,推测下层接触带存在矽卡岩型或脉状矿,结果使云龙矿床从中型规模变为大型规模;关键(2001)在开展1:50000综合物化探调查的基础上,利用地质—地球物理—地球化学综合找矿模型在吉林通化老岭成矿带成功地对隐伏金矿体进行了预测。

我国从早期的地质—地球物理模型、地质—地球化学模型,发展到现在的地、物、化、遥等多元信息综合找矿预测。王钟等(1996)通过对铜陵铜矿、新疆铜镍矿、滇东南锡多金属矿等矿床模型的研究,建立了一批具有中国特色的综合地学找矿模型,不仅完善了模型理论,而且对隐伏矿床的找矿预测形成了明确的技术方法。随着找矿难度的加大,综合地学找矿模型也面临着严峻的挑战。因为地球是个复杂的巨系统,找矿实际上也是个系统工程,需要多种新理论、新技术和新方法的综合应用,这也在客观上促进了综合地学找矿模型的发展,并且在实