

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.337>



# 聚矿构造系统与找矿

姚书振, 丁振举, 周宗桂, 胡新露

中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 聚矿构造系统是控制成矿物质迁移富集成矿的复合构造系统. 按其规模从大到小可划分为 7 个层次, 按照成因类型不同, 分为岩浆矿床、岩浆期后热液矿床、沉积-热水沉积矿床和变质矿床聚矿构造系统 4 大类. 重点阐述了矽卡岩型铁铜等矿床、斑岩型与斑岩-矽卡岩型铜钼矿床、岩浆期后高温热液钨锡矿床、岩浆期中低温热液金多金属矿床和热水沉积-改造型铅锌矿床聚矿构造系统的特征及其控矿规律. 总结了聚矿构造系统发育的有利部位及标志, 阐述了通过聚矿构造研究, 综合运用地质、地球物理与地球化学相结合的方法和类比求异的分析思路, 进行隐伏矿床(体)定位预测和寻求找矿突破的有效途径, 并提供了可借鉴的实例.

**关键词:** 聚矿构造系统; 控矿规律; 深部找矿; 矿床.

中图分类号: P613

文章编号: 1000-2383(2020)12-4389-10

收稿日期: 2020-10-30

## Ore-Accumulating Structural System and Mineral Exploration

Yao Shuzhen, Ding Zhenju, Zhou Zonggui, Hu Xinlu

Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The ore-accumulating structural system is a composite structural system which controls the migration and enrichment of ore-forming materials. The ore-accumulating structural systems can be divided into four genetic types: magmatic deposit structural system, magmatic hydrothermal deposit structural system, sedimentary-hydrothermal sedimentary deposit structural system and metamorphic deposit structural system. In this paper, the characteristics and ore-controlling regularities of the ore-accumulating structural systems for the skarn Fe-Cu deposits, porphyry and porphyry-skarn Cu-Mo deposits, magmatic hydrothermal W-Sn deposits, magmatic mesothermal-epithermal Au-polymetallic deposits, and hydrothermal sedimentary-reworked Pb-Zn deposits are discussed. It summarizes the indicators and favorable positions for ore-accumulating structures, and proposes the effective ways to explore concealed ore deposits (orebodies) through the study of ore-accumulating structures combining the geological, geophysical and geochemical methods as well as the analogy-seeking anomaly thoughts, and provides some examples for reference.

**Key words:** ore-accumulating structural system; ore-controlling regularity; deep ore exploration; deposits.

## 0 引言

矿床在地壳中分布具有局限性和不均匀性, 形成有经济价值的矿床需要成矿物质高度富集. 而矿床的形成总是离不开构造运动, 因为构造动力是物

质聚散的基本动力, 成矿物质在构造运动中迁移, 并在合适的构造部位聚集成矿, 可以认为矿床是地球构造运动形成的异常地质体. 成矿物质由分散到富集并形成矿床的过程, 受多种地质因素控制, 其中, 构造-建造-流体起了重要的作用. 在成矿过

基金项目: 中国地质调查局研究项目(Nos.200310200040, 20089939, 12120113094200).

作者简介: 姚书振(1947-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事矿床学和矿田构造研究. E-Mail: szyao@cug.edu.cn

引用格式: 姚书振, 丁振举, 周宗桂, 等, 2020. 聚矿构造系统与找矿. 地球科学, 45(12):4389-4398.

程中,从构造—建造—流体的相互关系来看,构造是控制一定区域中各地质体间耦合关系的主导因素,并且制约着矿床的空间展布.长期以来,人们关注板块构造及区域构造,特别是长期活动的超壳穿透性深大断裂对成矿物质活化、迁移、聚集成矿的控制作用,矿床学与矿田构造学家十分重视矿田构造与成矿作用关系的研究,并积累了丰富的成果.近年来,随着找矿难度的加大和现代找矿方法的发展,开始聚焦聚矿构造,特别重视大中型矿床的聚矿构造的研究,以期为寻找尚未发现的矿床(体)服务.本文在前期成矿系统、矿床成矿模式与找矿模型及矿田构造研究的基础上,提出聚矿构造系统的概念.聚矿构造系统与成矿构造一脉相承,是成矿构造研究的继承与深化,拟从系统论的视角,探讨构造控矿规律,重点研究聚矿构造系统的主要类型及其特征,总结典型矿床(田)聚矿构造的结构与矿体空间展布的规律性,为寻找隐伏的矿床(体)提供新思路.

## 1 聚矿构造系统及特征

### 1.1 聚矿构造系统及特点

聚矿构造系统是指使成矿物质迁移富集成矿的复合构造系统.包括导矿构造、配矿构造、储矿构造、保矿构造等.聚矿构造系统主要是由成矿前和成矿期构造耦合构成的复合构造系统,总体上控制矿带、矿田、矿床与矿体的形成与展布,是物化了的构造系统.

聚矿构造系统由下列地质构造要素组成.

(1)导矿构造:是指能使成矿地质体、成矿流体和成矿物质到达成矿区域的构造.人们常称其为导岩导矿构造,它们常为穿透很深的超壳型断裂和基底断裂系统,属深部构造中的一种线型构造带(聚矿构造),制约着深部岩浆及成矿物质的活化迁移,或聚矿盆地的形成与演化,控制区域构造—岩浆—成矿带或沉积—热水沉积聚矿盆地的展布.

(2)配矿构造:是指与导矿构造连通,能使成矿流体和成矿物质到达局部成矿部位的构造.它们常为规模较大断裂及不整合面等,又称为矿液通道.在成矿过程中起到辅助作用,其局部扩容部位亦可有矿体或矿化体产出.

(3)容矿构造:是指控制成矿物质聚集沉淀形成工业矿体的构造,又称储矿构造或成矿结构面.包括:①同生构造:岩性岩相及其界面构造、同生断

裂构造、火山构造、岩体的原生裂隙构造、隐爆或塌陷角砾岩体构造等;②后生构造:侵入接触构造、区域构造应力形成的断裂裂隙构造和褶皱构造等.不同类型矿床中的容矿构造类型不同,它们的空间配置决定了矿体的空间展布与矿床的内部结构.一般而言,在岩浆热液矿床中单一的原生结构面成矿规模有限,而复合型的容矿构造组合,易形成规模巨大的矿床.

导矿构造、配矿构造和储矿构造的最优配置是形成矿床的先决条件.此外,聚矿构造系统具有较长的持续活动性,使得成矿流体和成矿物质得以长期连续不间断地被迁移和聚集,可以导致大型、超大型矿床的形成.需特别指出的是,在成矿部位,成矿时圈闭的构造环境很重要,在圈闭的容矿构造环境中成矿物质不易散失,更易于聚集成矿.如后生热液金属矿床和油气矿床中常见的构造圈闭、地层岩性圈闭和地层与构造复合圈闭等,沉积—热水沉积矿床中常见的相对封闭并达到均衡补偿性沉积的凹陷或断陷盆地等.

此外,矿床形成后的保存条件也是聚矿构造的研究内容之一.严格地讲,它不属于聚矿构造系统的构成要素,而是成矿之后矿床是否会被剥蚀或保存的构造条件.一些具有较好聚矿构造条件的地段,在剥蚀较浅的构造环境下已形成的矿体得以保存,而剥蚀严重的构造环境下,不再具有寻找大中型矿床的价值.因此,从找矿的角度出发,有必要将保存条件和剥蚀程度纳入聚矿构造系统的研究内容之中.

### 1.2 聚矿构造系统的层次

聚矿构造系统在空间尺度上按照规模从大到小可划分为7个层次:①全球聚矿构造系统;②洲际聚矿构造系统;③成矿省级聚矿构造系统;④成矿区带聚矿构造系统;⑤成矿亚带或矿集区聚矿构造系统;⑥矿田级聚矿构造系统;⑦矿床级聚矿构造系统.它们分别对应于成矿全球系统(超巨系统)、成矿巨系统、成矿大系统、成矿系统、成矿亚系统、成矿子系统和成矿亚子系统(姚书振等,2011).低级别聚矿构造系统的发育受到高一级聚矿构造系统的约束,它们又受多级别构造体系的控制,总体上控制了全球、成矿域、成矿省、成矿区带、成矿亚带或矿集区、矿田和矿床的形成与分布.

深入研究①~⑤层次的聚矿构造系统,对揭示区域乃至全球成矿规律,指导区域成矿预测有重要

意义。而随着找矿难度的加大,在大比例尺成矿规律与成矿预测研究中,矿田级⑥和矿床级⑦聚矿构造系统的深入研究十分重要,通过对矿田及矿床级构造—流体—成矿作用关系和聚矿构造系统结构的深入研究,可以揭示矿床和矿体的分布规律,明确隐伏矿床与矿体的找矿方向。

笔者对著名的长江中下游铁铜金成矿带成矿系统的时空结构研究发现,长江中下游地区壳—幔岩石圈具有层块结构,深部莫霍面隆起、“江南式基底”和具岩石圈性质的长江破碎带构成的成矿区带聚矿构造系统,总体上控制着长江中下游燕山期岩浆—热液成矿带的形成与演化。在横向上,被十几条岩石圈深断裂切割成若干块段,随构造升降运动,形成本区隆坳相间的不均衡结构。NW 或近 EW 向岩石圈断裂与褶皱隆起区复合构成的成矿亚带或矿集区聚矿构造系统,控制了大冶—阳新、九瑞—丰山洞、铜陵、宁镇等铜铅金硫成矿亚系统和相应的成矿亚带(矿集区)产出。而 NE—NNE 向岩石圈断与隆—坳过渡部位复合构成的成矿亚带或矿集区的聚矿构造系统控制了矽卡岩型、岩浆—矽卡岩复合型铁和铁铜金成矿亚系统(亚带)的形成和展布,如鄂城—灵乡;在 NNE 向中生代继承式断陷火山岩盆地中,发育玢岩铁矿成矿亚系统(亚带),如宁芜、庐枞。

除岩石圈断裂外,还有许多基底断裂和盖层大断裂,这些断裂在岩石圈断裂所分割的各大断块中,交织在一起形成不同几何构型的网格构造。基底断裂与岩石圈断裂在深部连通,成为岩浆上升的通道,它们和盖层/基底滑脱带共同控制高位岩浆房或大岩基,构成矿田级聚矿构造系统。进而控制矿田的形成与展布。其中,盖层断裂—含矿岩株(体)组合构成的断裂—岩浆网络系统结构,共同决定了成矿亚带中矿田和矿床的定位,使其矿田级聚矿构造系统垂向上具有“三层结构”的特点,矿床空间展布有 NW 向成行、NEE 向成列和网格结点附近成岩成矿的特点,如九瑞—丰山洞成矿亚带。铜陵地区网格构造的形式较为复杂,尽管其盖层构造主体是 NE 向“S”型的断褶束,但基底构造却由一组近 EW 向和 SN 向的基底断裂构成,形成近矩形构型的网格构造,其网格结点同样控制了主要岩浆岩群和矿田的分布。如铜陵铜矿田、狮子山铁铜矿田和沙滩角铜矿田等。宁芜断陷火山岩盆地中,近 EW、NNE 和 NW 向基底断裂交切所形成的网格结点,明

显控制了多个火山—侵入活动的中心,形成了梅山矿田、凹山矿田和钟姑矿田等几个大的铁矿田。

各矿田中矿床和矿体产出主要受矿床级侵入接触聚矿构造系统的控制,侵入接触构造系统的多样性使矿床矿体产出各具特色。此外,构造和岩浆活动的耦合是成矿系统发育的重要动力学机制,相对持续稳定的矿田构造应力场和成矿流体系统是形成大型矿床(田)的有利条件。在聚矿构造系统发育深度较大时,有可能发现深部的隐伏矿床(体)。

## 2 岩浆热液矿床聚矿构造系统

随着矿床成矿模式和找矿模型研究的日益深入,对构造控矿规律的认识也不断深化。近年来,由叶天竺等(2017)总结提出针对矿田、矿床尺度的成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征标志的“三位一体”找矿模型的研究,为深化金属矿床聚矿构造系统的研究打下了良好的基础。其中,把成矿构造系统划分为沉积构造系统、火山构造系统、岩浆侵入构造系统、褶皱构造系统、断裂构造系统、复合构造系统等 6 大系统。由于不同成因的金属矿床(田)的形成与产出的构造环境和控矿构造类型的差异性,其聚矿构造系统也各具特色,为了利于研究与找矿中的应用,参照矿床成因分类,可大致划分为:①岩浆矿床聚矿构造系统;②岩浆期后热液矿床聚矿构造系统;③沉积—热水沉积矿床聚矿构造系统;④变质矿床聚矿构造系统 4 大类,每个大类还可以划分为若干亚类。其中,岩浆热液矿床聚矿构造系统和沉积—热水沉积矿床聚矿构造系统研究的较为深入,它们的主要特征概括如下。

### 2.1 矽卡岩型铁铜等矿床的聚矿构造系统

该类矿床的聚矿构造系统属岩浆侵入聚矿构造系统。包括区域构造、侵入接触构造等。容矿构造主要有:接触带构造、褶皱构造、断裂构造、不同岩性界面(硅钙面)等。

这类构造主要指在侵入体接触带范围内,由成矿前褶皱与断裂、岩浆侵入作用、岩石的变形变质作用所形成的构造要素是互相联系的,在时间上有一定的发生次序,在空间上呈有规律的排列,在形成机制上是互有联系的(翟裕生和林新多,1993)。有利储矿构造主要有断裂复合的接触带构造、断裂复合的褶皱构造,不同岩性界面等。

成矿期的断裂构造带是成矿流体到达成矿部位的通道—导矿构造,断裂复合的接触带构造是大

型矿床主要的容矿构造,往往形成大型矿体,如铁山、程潮、金山店等大型铁矿均产断裂复合的接触带中.在成矿期的断裂与岩体顶缘接触带附近褶皱大理岩残留体—捕虏体复合时,往往形多层状鞍状与囊状矿体,如铜绿山大型铜矿、翠宏山大型铁锌多金属矿床、灵乡铁矿床等.成矿期的次级断裂常起配矿构造作用,它们穿切接触带进入围岩,使成矿流体到达容矿构造部位,形成受层间构造控制的似层状矿体和受断裂裂隙控制的脉状或分枝状的矽卡岩体和矿体,在断裂构造交会处还可形成囊状、柱状富矿体,如个旧锡矿床.

不同岩性界面(硅/钙面)也是层状矽卡岩矿体的主要容矿构造.一般为碳酸盐岩和砂板岩、硅质岩接触层面,部分与层间断裂片理化带相重合.如长江中下游地区的铜山铜矿、桃冲铁矿、福建洛阳铁矿、马坑铁矿,均受C/D的硅钙面控制,矿床以层状、似层状为主.

受侵入体接触聚矿构造控制,矽卡岩型矿床矿体空间展布具有深浅二元空间结构.矿体赋存于侵入体接触带、捕虏体接触带、外接触带背形褶曲轴部、层间破碎带、硅钙岩性界面.常形成成矿侵入体接触带和外接触带缓倾斜顺层(硅钙面叠加褶曲或同生断层)产出规模巨大的矿体,如安徽铜山铜矿、福建洛阳铁矿.

矽卡岩型锡多金属矿的主要成矿结构面为侵入体接触带、断裂和岩性层面.岩体顶部接触带控制矽卡岩,而一些沉积岩的岩性接触面,尤其是硅钙面对硫化物矿体的分布产生重要影响,其中,碳酸盐岩与上部玄武岩、细碎屑岩的界面,碳酸盐岩与早期形成的岩体或岩脉的界面,均是硫化物矿体的重要赋存位置.多数矿床中,断裂主要对外围硫化物矿体的形态影响较大,铜锡、铅锌矿体往往沿断裂分布.

## 2.2 斑岩型与斑岩—矽卡岩型铜钼矿床聚矿构造系统

该类矿床的聚矿构造系统属浅成岩浆侵入接触成矿构造系统.其中,基底大断裂是导岩导矿构造,旁侧配套的次级断裂常起配矿作用.含矿岩体受断裂交切褶皱复合控制,包括深断裂旁侧配套的断裂和褶皱控制、产出于背斜轴部或倾伏端产生的虚脱空间.

容矿构造主要有斑岩体顶部接触带附近的水压裂隙构造、爆破角砾岩体构造,接触带附近的

整合面、层间破碎带、断裂构造等.围岩的岩性对成矿有一定影响,通常当围岩为渗透性差的硅铝质岩石时,矿体往往发育在斑岩体顶部和附近的围岩中,当围岩为碳酸盐岩时,则出现矽卡岩型矿体与斑岩型矿体共存.

岩体顶部流体作用形成的水压裂隙—破裂系统是斑岩型矿床的主要容矿构造,网脉状裂隙直接控制着细脉浸染状矿化和面型蚀变,构成主要斑岩型矿床的主体.隐爆角砾岩体构造也是斑岩型矿床的主要容矿构造之一,多呈椭圆状、不规则的筒状产出,往往控制富矿体的产出,有时成为大型超大型矿床的主体容矿构造,如沙坪坝、岔路口超大型钼矿床.成矿时叠加的断裂构造,则控制斑岩铜矿的外围脉状矿体(化)产出,如朱砂红、多宝山和甲玛等矿床.在斑岩体与碳酸盐岩接触带构造中,形成矽卡岩型矿体,侵入接触带构造与层间构造或岩性界面(硅/钙面)连通时,则形成似层状矿体.我国斑岩型铜钼矿床围岩中的矿量约占2/3,斑岩中的矿量约占1/3.总的来说,斑岩型矿床工业矿化主要产于接触带中,环绕斑岩体产出,一般呈空心环状,只有少数大型和特大型矿床的斑岩顶部才是全岩矿化,如沙坪坝、岔路口斑岩型钼矿床.

矿床中容矿构造组合制约矿床的矿化类型及矿体的空间展布,大型矿床矿化类型及矿体空间展布的组合规律如下.

“二位一体”:斑岩体上部围岩中沿断裂裂隙构造发育的脉状或层状铅锌或金铜矿体,下部矿体为受侵入接触带控制的矿体,分布于斑岩体顶部及围岩中,为细脉浸染型层块型或筒状矿体,即(上脉下体)的二元结构.这是典型斑岩型矿床的构型,如德兴铜矿床.

“三位一体”:矿床形成受侵入接触带构造、隐爆角砾岩体构造和岩体裂隙构造的联合控制,在侵入接触带形成矽卡岩型铜矿,在岩体内裂隙带形成斑岩型铜(钼)矿,在隐爆角砾岩体中形成角砾岩筒型铜、钼矿,构成了矽卡岩—斑岩—角砾岩筒复合型铜、钼矿床,如丰山洞、铜山口铜矿床.

“四位一体”:矿床形成受侵入接触带构造、岩体裂隙构造、隐爆角砾岩构造和层间构造联合控制组,典型的矿床是城门山矿床.在上述4种容矿构造中,分别形成了矽卡岩型铜矿、斑岩型铜钼矿,角砾岩筒型钼矿和似层状铜矿体,构成了“四位一体”的成矿特征.

### 2.3 岩浆期后高温热液钨锡钼矿床聚矿构造系统

该类矿床通常发育在中深成岩体穹顶部的接触带附近,多以石英脉型钨矿为主,近年来又发现内接触带云英岩型细脉浸染型钨矿。其矿田级的聚矿构造系统包括基底断裂与大型褶皱构造,前者起导岩导矿作用,矿床级聚矿构造系统属中深成岩浆侵入成矿构造系统,规模较大的成矿期断裂常是配矿构造。其容矿构造包括侵入接触构造、断裂构造、不同岩性界面(硅/钙面)等。

断裂裂隙构造是石英脉型钨锡矿的主要容矿构造。关于容矿的断裂构造的性质尚有争议,有人认为是水压断裂裂隙系统,也有人认为是区域构造作用为主的断裂裂隙系统。大多数矿床的容矿断裂常以一组为主,且成矿具有多阶段性,不具备水压断裂裂隙系统在岩穹顶部呈放射状,且以张裂隙为主的特征。详细的矿田构造应变史发现,水平的挤压作用和上隆的拉伸作用对矿田构造的形成发展和成矿作用是两个基本的构造因素,前者促使褶皱、断裂的生成,后者则促进构造的张开和充填(曾庆丰,1982)。但成矿期内成矿地段多期次的隆升作用可能性不大,构造的张开和充填更可能是水压作用引起的,其容矿断裂可能是沿袭了早期区域构造形成的断裂裂隙系统、同成矿期水压作用与区域构造应力作用交替的产物。

该类矿床中矿化样式浅部具有五层楼模式:沿断裂构造形成顶部为细脉带、向深部脉体逐渐加大,转化为粗脉和稀疏大脉,直到成矿地质体内接触带 300~500 m 范围内。此外,部分重要岩性界面及不整合面附近可能出现横向交代作用形成的缓倾斜矿化或蚀变。深部内接触带有时发育云英岩化细脉浸染状矿化而形成似层状矿体。形成矿体空间展布呈现“上脉下体”(华仁民等,2015)的内外“二元结构”特征,例如赣南钨矿、广西栗木锡矿。

### 2.4 岩浆期后中低温热液金多金属矿床聚矿构造系统

该类矿床是指与深成岩浆热液作用有关的中低温热液型金多金属矿床,包括石英脉型、破碎蚀变岩型、微细浸染型金等矿床。该类矿床的聚矿构造属褶皱—断裂构造系统。区域性大型背斜(穹隆)构造与大型断裂(或剪切带)复合系统控制了成矿岩体和矿田的产出,大型断裂为导岩导矿构造。矿床主要形成在背斜轴部、转折端,如胶东、小秦岭、黔西南、陕川甘金矿集区(赵新福等,2019)。容矿构

造以断裂构造、硅钙面和层间构造为主。

**2.4.1 石英脉与蚀变岩型金矿聚矿构造** 大型石英脉与蚀变岩型金矿的容矿构造主要是成矿期的脆性断裂构造,多经历了压扭性到张扭性的变化,在平面和剖面上均呈舒缓波状,延深大于延长,走向或倾向变化之处常是矿体增厚地段。石英脉型金矿常以陡—中等倾斜的脉群产出,蚀变岩型金矿以中—低倾角产出,矿带内常见矿体尖灭再现或侧列再现(如李国猛等,2020)。

石英脉型金矿床中矿体(富矿段)主要产于断裂的张性(张扭性)扩容部位,其侧伏有一定的规律性,与容矿构造的产状和运动方式有密切关系。如成矿期 NE 向断裂,一般若断层面面向 NW 倾斜,为左行压扭性或右行张扭性断裂时,矿体(富矿段)向 SW 侧伏;若为右行压扭性或左行张扭性断裂时,则矿体(富矿段)向 NE 侧伏。

在空间分布上,大型蚀变岩型金矿床延深较大,主要产于临近成矿地质体的主干断裂带上,延深可达数百米到 3~4 km(胶东);而石英脉型金矿形成深度较小,构造张开度较大,延深一般数百米(胶东等),局部可达 2~3 km(小秦岭)。此外,石英脉型金矿边部和深部尖灭端出现蚀变岩型金矿化的现象较常见,在矿田(床)范围内,石英脉型金矿体向下可过渡为蚀变岩型金矿体(如望儿山),构成具有二元结构的分带样式。

**2.4.2 微细浸染型金矿的聚矿构造** 微细浸染型金矿的聚矿构造主要为褶皱(或穹隆)与断裂(剪切带)复合构造系统,基底大断裂是导矿构造,盖层大断裂是配矿构造。容矿构造主要有断裂、岩性界面(硅/钙面)及不整合或假整合面、层间构造与有利的岩层。

根据矿床与成矿岩体在空间分布上远近不同,将我国微细浸染型金矿床划分为近成、中远成和远成式 3 个基本类型(姚书振等,2020)。近成式矿床通常发育于成矿地质体与围岩接触面 0~2 km 的接触热变质岩(角岩)带范围内,受脆—韧性剪切带控制,并有脉岩伴生,以断控型矿体为主,如李坝、八卦庙、马鞍山等金矿床;局部发育矽卡岩型矿体,成矿发生在矽卡岩期之后,如阿西金矿床。中远成式矿床离大侵入体较远,通常发育于接触热变质岩(角岩)带之外,距成矿地质体与围岩接触面 2~4 km 的范围内,矿床内浅成—超浅成中酸性岩脉群发育,矿体受脆性、脆—韧性断裂构造控制,以断控

型矿床为主,如阳山、寨上、大水等金矿床.远成式矿床远离大侵入体( $>4$  km),中酸性岩脉不发育,层状岩性圈闭构造、硅/钙面和脆性断裂是主要的控矿构造,通常发育层控整合型、断控型和复合型矿体.岩性圈闭构造控矿以水银洞金矿床为代表,硅/钙面控矿以戈塘、大桥及水银洞金矿床较典型,脆性断裂控制的矿床有紫木函、烂泥沟、东北寨、马脑壳等金矿床(Hu *et al.*, 2018).

该类矿床中矿化样式具有二元结构的特点,主要受容矿构造的结构和空间组合关系控制.在剥蚀程度较小的远成式矿床中浅部产出小型断控型似脉状矿体,下部产出受硅/钙面和有利岩性圈闭构造控制的多个大型层状矿体(如水银洞),或者浅部产出大型断控型似脉状矿体,深部产出多个小型层状矿体(如紫木函).此外,断控型似脉状矿体在顶部尖灭带常形成网脉状矿化蚀变带,这一现象在远成式、中远成式和近成式矿床中均有表现,可以作为寻找隐伏矿体的标志.

### 3 热水沉积及热水沉积—改造型矿床聚矿构造系统

热水沉积型矿床,又称 Sedex 矿床,是富含金属元素的流体沿着同生断裂喷出海底,由于物理化学条件的改变在喷口或附近海底沉积形成的,矿体呈层状、似层状赋存于沉积岩中,主要是碎屑岩、碳酸盐岩.

该类矿床的聚矿构造属同沉积成矿构造系统.矿床产出主要受伸展构造背景的裂谷盆地控制,产在穿透性盆地断裂附近,与盆地深部热异常驱动的对流循环有关.如秦岭泥盆系 Pb-Zn 成矿带为我国著名的巨型铅锌成矿带,自东向西依次集中发育有山柞、凤太、西成 3 个矿化集中区,其中尤以后两者最为突出,集中产出许多大中型铅锌矿床.矿床主要位于一级或二级盆地边缘附近的三级聚矿盆地中,聚矿构造为沉积盆地及边缘同生断裂构造.同生断裂一般为正断层,两盘沉积物岩性与厚度明显不同,下降盘发育大量喷流岩.它是成矿流体上升的通道,也是下部网脉状矿体赋存部位.主要矿体受沉积成岩构造控制,并主要赋存在硅质岩、重晶石岩、碧玉岩等热水喷流沉积岩和化学沉积岩与下伏碳酸盐岩或碎屑岩的界面附近,受构造—流体幕式活动,可形成多层状矿体.形成“上层下脉”的二元空间结构式.

值得特别指出的是,我国这类矿床形成较早,在后期造山运动的过程中,多受到变形变质作用的改造和后生热液叠加改造,转变成成为热水沉积—改造型矿床,铅锌矿床(矿带)空间分布受区内褶皱构造控制,矿田尺度上铅锌矿床具有“界面控矿”规律,铅锌体主要产于千枚岩地层中的薄层灰岩、泥质岩与碳酸盐岩层岩性界面附近的碳酸盐岩一侧.后期热液改造成矿作用主要受控于泥质岩石(隔水层)和碳酸盐岩层(相对透水)组合控制,具有圈闭构造控矿的特点,如秦岭西城矿田.

### 4 聚矿构造系统的识别及其在找矿中的应用

在矿产地质调查和评价中,识别和分析聚矿构造系统的类型及其控矿规律,在指导新矿床和矿体的发现时具有事半功倍的作用.在识别和分析聚矿构造系统过程中,运用类比求异的思维,充分利用成矿与找矿新理论和有效的地质物化探方法技术,是取得找矿突破的必由之路.

#### 4.1 聚矿构造系统发育的有利部位及特点

聚矿构造系统是异常地质体.在矿产地质调查和评价中,运用地质异常成矿预测理论(赵鹏大和陈永清,1998)为指导,寻找聚矿构造系统发育的有利部位,探讨其与矿床的形成以及时空分布的内在联系是新的方向.本文重点探讨的矿田和矿床级的聚矿构造系统属于局部性地质异常,是控制成矿区带内矿田、矿床和矿体产出的地质异常,是成矿物质迁移、富集和就位的通道和场所,是物化了的构造系统.如上所述,不同矿床的聚矿构造系统各有特色,就控制岩浆期后热液金属矿床(矽卡岩型铁铜矿床、斑岩—矽卡岩型铜钼矿床、高温热液钨锡矿床、中低温热液金多金属矿床等)的聚矿构造系统来看,它们主要发育在下列异常地段.

(1) 盖层断裂与背斜(穹窿)构造复合部位.矿床的形成与构造—岩浆活动密切相关,其聚矿构造系统有共性,主要由控制岩浆活动和就位的断裂—褶皱构造,其中断裂(包含基底断裂和盖层断裂)与背斜构造复合构造控制了矿田与矿床的产出.基底断裂规模较大,控制大型矿集区或矿田的形成和展布,盖层断裂与背斜(穹窿)构造复合常是成矿岩体与大部分岩浆期后热液矿床产出的有利部位.而岩浆期后中低温热液金汞锑矿床也多位于盖层断裂与背斜(穹窿)构造复合部位,地表无岩体出露,近

年来的地球物理资料解释表明深部存在隐伏岩体,成矿流体通过陡立的断裂到达成矿部位聚集成矿,并能形成大型与超大型矿床,如黔西南、陕甘川邻接区的水银洞、烂泥沟、马脑壳、大桥等金矿床。

(2)多期次构造—岩浆活动中心.区域成矿系列的时空结构和成矿集约性研究发现,大型和超大型矿床产出在多期次构造—岩浆活动中心部位.表现为矿床中可见多期次岩浆活动,如岔路口超大型钼矿床中,先后有中奥陶世时期花岗斑岩侵入→中—晚侏罗世时期(约 163 Ma)黑云母二长花岗岩侵入→晚侏罗世时期(约 147 Ma)含矿花岗斑岩侵入→早白垩世时期(约 135 Ma)石英二长斑岩和闪长玢岩等岩脉侵入.而大规模成矿作用主要发生在晚期花岗斑岩体形成过程中,暗示成矿部位处于与深部岩浆房长期沟通部位,并有明显的分异作用.在某些大型矿床中,可以见到两期成矿系统的叠加,形成大型矿床,如城门山铜矿曾经历了燕山中期构造活动所诱发的岩浆热液成矿作用形成矽卡岩型和斑岩型为主的铜矿体,燕山晚期的构造—岩浆活动又导致斑岩型和角砾岩筒型钼(铜)矿体的形成.两期成矿作用产物在空间上毗邻,并有相当程度的重叠,使得矿质在一个不太大的空间内聚集成巨大的矿床.也表明多期次构造—岩浆活动中心是大型、超大型矿床产出的有利构造环境(Hu *et al.*, 2014, 2017, 2019).

(3)岩体的岩凸和小型斑岩体的顶部.矿田(床)级聚矿构造发育的有利部位有:①大型深成岩体的岩凸部位,如个旧锡多金属矿田,矿床发育在“上有背斜(弯隆),下有岩凸”的部位;②侵入前峰带,如铜绿山铁铜金矿田发育在阳新大型岩体西端侵入前峰带,有多期构造岩浆侵入和成矿作用发生,形成大型铁铜矿床和斑岩型金(铜)矿床;③小型浅成斑岩体的顶部是矿床级聚矿构造发育的有利部位,也是大型矿床和超大型斑岩型铜钼矿床产出部位。

(4)构造圈闭与浅剥蚀区.通过区域成矿系列的时空结构和成矿集约性研究发现,构造圈闭与浅剥蚀区是大型矿床有利的产出部位.如大兴安岭北段大型和超大型矿床主要为斑岩型铜钼矿床,主要形成于加里东晚期和燕山中期,分布在古生代隆起带与中生代火山岩盆地的过渡带上.该部位是有利的构造圈闭环境,利于成矿物质的聚集和大规模成矿作用的发生,形成大型、超大型矿床.此外,从多宝山、小柯勒河、大黑山等大型铜、铜钼、钼(铜)矿

床和岔路口超大型钼矿的矿化蚀变分带均保存的较完整,一般由斑岩体内向外发育钾化带→石英—绢云母化带→青磐岩化带,相应呈现 Mo→Cu→Pb、Zn(Au)矿化带等,表明成矿后矿床处于浅剥蚀区,剥蚀程度较小,使其得以较完整的保存。

(5)聚矿构造系统发育部位常有矿致地球物理地球化学等异常.聚矿构造系统是物化了的构造系统,在岩浆侵入、流体活动与成矿过程中会形成一系列的矿致异常,如岩体引起的磁异常和重力异常,铁矿引起的磁异常和重力异常,铜钼矿床引起的激电异常和 Mo、Cu、Pb、Zn(Au)化探异常,金矿伴随的 Au、As、Hg、Sb 异常等.此外,成矿过程中,构造—流体—成矿作用具有同步性和脉动性,表现在成矿具有多阶段性.通常从早到晚依次发育高温—中温—低温阶段的蚀变与矿化.浅部或地表常发育外带的热液蚀变岩石与矿化脉体,也是重要的矿致异常.通常,这些矿致异常发育部位显示深部有隐伏的聚矿构造系统和隐伏矿床(体),而无矿致异常发育的地质异常地段则非聚矿构造系统和隐伏矿床(体)发育的有利区.矿致异常可以作为聚矿构造系统是否发育以及是否能找到隐伏矿床(体)的判断依据之一。

#### 4.2 矿床聚矿构造识别及其应用

构造运动不仅控制地史时期地壳上的沉积建造展布、岩浆活动、火山喷发及区域变质作用,同时聚矿构造还为含矿流体的运移和沉淀提供通道和堆积场所.因此,在聚矿构造研究中,综合运用地质、地球物理与地球化学相结合的方法识别聚矿构造类型及其特征,以类比求异的分析思路,指导隐伏矿床(体)的发现,是寻找找矿突破的有效途径。

通常,一定地质过程所产生的聚矿构造系统及其控制矿体的空间构型往往会呈现空间自相似性或统计自相似性,一定成矿系统所产生的矿床(田、带)也往往具有自相似性,这是成矿动力学系统的自组织现象的表现.如前所述岩浆期后高温热液钨锡矿床聚矿构造系统控制的矿体空间构型呈“上脉下体”的内外“二元结构”特征,热水沉积—改造型矿床的聚矿构造系统控制的矿体空间展布上具有“界面控矿”和褶皱圈闭构造控矿的规律性.可以运用相似类比的方法指导隐伏矿床(体)的发现。

笔者 2004 年曾到甘肃省祁连山小柳沟钨矿田进行调研.该矿田位于一个 NW 向由长城系朱龙关群组成的穹隆构造中,其周边已探明有小柳沟、世

纪、祁宝、贵山矽卡岩型钨矿床,中部发育多组石英脉尚未评价,地表无岩体出露.调研中甘肃省有色地矿局高兆魁总工程师研究发现,该穹隆构造与祁连造山带主体构造不协调,可能是由隐伏岩体引起的,根据岩浆期后热液钨钼矿具有“上脉下体”的空间分带规律,提出石英网脉带可能是含矿的,深部隐伏岩体中可能存在斑岩型钨钼矿化,建议进行高精度磁测,查明隐伏岩体的顶面,进行进一步的勘查与评价.此后,甘肃有色地矿局进行了高精度磁测和深钻控制,穹隆构造中部的石英脉型钨矿储量已达大型规模,深部岩体顶缘内接触带存在厚大的细脉浸染型钨矿体已达到大型规模,取得了找矿的新突破.构成了矽卡岩型、斑岩型与石英脉型“三位一体”的大型钨钼矿田.

在秦岭造山带成矿规律与成矿预测研究中,笔者对著名的西成超大型热水沉积型铅锌矿田构造控矿规律进行了深入研究,提出了“界面”控矿规律的新认识,建立了以综合找矿标志为证据层的证据权模型,圈定了找矿远景区(姚书振等,2006),构建了“层位(热水硅质岩)+界面(碳酸盐岩/碎屑岩)+圈闭构造”的矿床尺度的找矿模型.在此基础上,指导企业在郭家沟矿区开展隐伏矿体定位预测,利用EH4电磁测深技术圈定了矿区内碳酸盐岩与碎屑岩的岩性界面形态,经过钻探工程验证,取得了找矿重大突破.目前,该矿床以控制Pb+Zn金属量超过300万t,银金属量超过1000t(张世新等,2019).

在已有矿床深部找矿中,需要在总结矿床聚矿构造的构型和矿体空间展布规律基础上,深入研究容矿构造特征和向深部的变化趋势,这对新矿体的发现有重要的指导意义.往往需要运用构造地球化学与有限元分析方法,查明矿液流向和矿体侧伏规律(陈耀煌等,2014;谭满堂等,2014;Zeng *et al.*, 2017),为深部隐伏矿体定位预测提供重要的依据.此外,采用现代物探技术方法(如2.5D/3D定量反演等),提取和定量评价矿致异常,揭示容矿构造和矿体的空间分布规律对新矿体的发现也是有效途径.如我们在研究了黑龙江省翠宏山铁多金属矿田成矿地质体、成矿结构面和成矿作用特征标志的基础上,运用2.5D/3D定量反演技术,揭示出翠中矿段容矿构造与矿体分布具有“多层U形”分布的规律,圈定了深部找矿靶区.经企业对钻探工程验证,发现了新矿体,并与物探解译结果较为吻合(徐航宇等,2019;杨健等,2020).

此外,在深部矿产、隐伏矿产、覆盖区矿产等非传统矿产预测中,相似类比准则会受到一定局限,求“异”显得尤为重要(赵鹏大,2007),将地质异常理论与奇异性理论相结合,来探讨地质异常的非线性特征,利用非线性动力学理论和非线性数据处理技术定量圈定和识别深部源致矿地质异常(成秋明,2011),通过对矿床聚矿构造系统与矿致异常的定量化研究,提高对隐伏矿床(体)的定量预测效果,是矿床聚矿构造系统及其应用研究的新方向.

## 5 结论

聚矿构造系统是指控制成矿物质迁移富集成矿的复合构造系统,是物化了的构造系统.在空间尺度上按照规模从大到小可划分为全球、洲际、成矿省、成矿区带、成矿亚带或矿集区、矿田和矿床级7个层次,总体上控制了全球、成矿域、成矿省、成矿区带、成矿亚带或矿集区、矿田和矿床的形成与分布.矿田和矿床级聚矿构造系统,按照成因类型不同,可划分为岩浆矿床、岩浆期后热液矿床、沉积—热水沉积矿床和变质矿床聚矿构造系统4大类.其中,岩浆期后热液矿床聚矿构造系统属岩浆侵入接触聚矿构造系统,其环绕成矿岩体产出,常有多种容矿构造组合并具有垂向分带性,控制矿化类型及矿体空间展布具有“多位一体”的共生组合规律,垂向上呈现“上脉下层”或“上脉下体”的二元空间结构样式.热水沉积型矿床的聚矿构造系统由同生断裂与沉积层状构造控制的矿体空间展布上具有“上层下脉”的二元空间结构样式,热水沉积—改造型矿床则有“层位+界面+褶皱圈闭构造”控矿的规律.矿田和矿床聚矿构造系统属于局部性地质异常,在矿产地质调查和评价中,运用地质异常成矿预测理论为指导,寻找聚矿构造系统发育的有利部位,探讨其与矿床的形成及矿体时空分布的内在联系,综合运用地质、地球物理与地球化学相结合的方法和类比求异的分析思路,进行隐伏矿床(体)的定位预测,是寻求找矿突破的有效途径.

致谢:感谢中国地质调查局、中国地质大学(武汉)地质调查研究院和各地矿局对作者研究工作的支持与帮助,感谢中国地质大学(武汉)地质调查研究院和《地球科学》编辑部的约稿,感谢匿名评审专家对本论文所提的建设性意见.



## References

- Chen, Y.H., Yao, S.Z., Zeng, G.P., et al., 2014. Ore-controlling Structure and Mineralization Rules of Main Auriferous Quartz Veins in the Daping Gold Deposit: An Example of the Ailao Shan Metallogenic Belt in Yunnan Province. *Geology and Exploration*, 50(3): 419–431 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q.M., 2011. Singularity Modeling of Geo-Anomalies and Recognition of Anomalies Caused by Buried Sources. *Earth Science*, 36(2): 307–316 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X.L., Ding, Z.J., He, M.C., et al., 2014. Two Epochs of Magmatism and Metallogeny in the Cuihongshan Fe-Polymetallic Deposit, Heilongjiang Province, NE China: Constrains from U-Pb and Re-Os Geochronology and Lu-Hf Isotopes. *Journal of Geochemical Exploration*, 143: 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.027>
- Hu, X.L., Gong, Y.J., Pi, D.H., et al., 2017. Jurassic Magmatism Related Pb-Zn-W-Mo Polymetallic Mineralization in the Central Nanling Range, South China: Geochronologic, Geochemical, and Isotopic Evidence from the Huangshaping Deposit. *Ore Geology Reviews*, 91: 877–895. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.08.016>
- Hu, X.L., Gong, Y.J., Zeng, G.P., et al., 2018. Multistage Pyrite in the Getang Sediment-Hosted Disseminated Gold Deposit, Southwestern Guizhou Province, China: Insights from Textures and In Situ Chemical and Sulfur Isotopic Analyses. *Ore Geology Reviews*, 99: 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.05.020>
- Hu, X.L., Yao, S.Z., Zeng, G.P., et al., 2019. Multistage Magmatism Resulting in Large-Scale Mineralization: A Case from the Huojihe Porphyry Mo Deposit in NE China. *Lithos*, 326: 397–414. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.12.036>
- Hua, R.M., Wei, X.L., Wang, D.S., et al., 2015. A New Metallogenic Model for Tungsten Deposit in South China's Nanling Area: Up Veins + underneath Mineralized Granite. *China Tungsten Industry*, 30(1): 16–23 (in Chinese with English abstract).
- Li, G.M., Jiang, W., Shi, W.J., et al., 2020. Regularities of Ore-controlling Structures and Exploration Predictions of Buzhu Au (Sb) Deposit in Kangma County, South Tibet, China. *Earth Science*, 45(6): 2117–2134 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.271>
- Tan, M.T., Yao, S.Z., Ding, Z.J., et al., 2014. Trend Surface Analysis of Main Ore Veins with Applications in Mineral Resources Prediction in Xiaoqinling Gold Ore Field. *Earth Science*, 39(3): 303–311 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H.Y., Yang, Y.S., Li, C.F., et al., 2019. Evaluation of Gravity and Magnetic Anomalies in the Cuiwei Area, Xunke County, Heilongjiang Province. *Geology and Exploration*, 55(4): 986–998 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J., Hu, X.L., Li, C.F., et al., 2020. Petrogenic and Metallogenic Geochronology, Geochemical Characteristics and Its Geological Implications of Cuizhong Fe Polymetallic Deposit, Heilongjiang Province. *Earth Science*, 45(5): 1593–1608 (in Chinese with English abstract).
- Yao, S.Z., Gong, Y.J., Hu, X.L., et al., 2020. The Main Metallogenic Systems and Metallogenic Lineages around the Middle and Upper Yangtze Block. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 218–231 (in Chinese with English abstract).
- Yao, S.Z., Zhou, Z.G., Gong, Y.J., et al., 2011. Primary Discussion on the Temporal-Spatial Structure and Tectonic Controls of Metallogenic Systems. *Geological Bulletin of China*, 30(4): 469–477 (in Chinese with English abstract).
- Yao, S.Z., Zhou, Z.G., Lü, X.B., et al., 2006. Mineralization Characteristics and Prospecting Potential in the Qinling Metallogenic Belt. *Northwestern Geology*, 39(2): 156–178 (in Chinese with English abstract).
- Ye, T.Z., Wei, C.S., Wang, Y.W., et al., 2017. Theory and Method of Ore-Prospecting Prediction in Exploration Areas (A piece Theory). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zeng, G.P., Gong, Y.J., Wang, Z.F., et al., 2017. Structures of the Zhazixi SB-W Deposit, South China: Implications for Ore Genesis and Mineral Exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 182: 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.07.010>
- Zeng, Q.F., 1982. The Characteristics and the Development of Ore Field Structure. *Scientia Geologica Sinica*, 17(1): 47–55 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y.S., Lin, X.D., 1993. Study of Ore Field Structures. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhang, S.X., Ding, Z.J., Yao, S.Z., et al., 2019. Metallogenic Prediction and Practice of Concealed Pb-Zn Deposits in Xicheng Ore Field. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhao, P.D., 2007. Quantitative Mineral Prediction and Deep Mineral Exploration. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P.D., Chen, Y.Q., 1998. The Main Way of Geo-Anoma-

ly Location of Ore Body. *Earth Science*, 23(2):111—114 (in Chinese with English abstract).

Zhao, X. F., Li, Z. K., Zhao, S. R., et al., 2019. Early Cretaceous Regional-Scale Magmatic-Hydrothermal Metallogenic System at the Southern Margin of the North China Carton. *Earth Science*, 44(1): 52—68(in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.372>

#### 附中文参考文献

陈耀煌,姚书振,曾国平,等,2014.大坪金矿床主矿体控矿构造与矿化富集规律.地质与勘探,50(3):419—431.

成秋明,2011.地质异常的奇异性度量与隐伏源致矿异常识别.地球科学,36(2):307—316.

华仁民,韦星林,王定生,等,2015.试论南岭钨矿“上脉下体”成矿模式.中国钨业,30(1):16—23.

李国猛,姜维,石文杰,等,2020.藏南康马县布主金(锑)矿构造控矿规律及找矿预测.地球科学,45(6):2117—2134.

谭满堂,姚书振,丁振举,等,2014.小秦岭金矿田典型矿脉矿化趋势面分析与深部预测.地球科学,39(3):303—311.

徐航宇,杨宇山,李春芳,等,2019.黑龙江省逊克县翠巍重磁异常评价.地质与勘探,55(4):986—998.

杨健,胡新露,李春芳,等,2020.黑龙江省翠中铁钨多金属矿床成岩成矿年代学、地球化学特征及地质意义.地球科学,45(5):1593—1608.

姚书振,宫勇军,胡新露,等,2020.中上扬子地块周缘主要金属成矿系统及成矿谱系.地学前缘,27(2):218—231.

姚书振,周宗桂,宫勇军,等,2011.初论成矿系统的时空结构及其构造控制.地质通报,30(4):469—477.

姚书振,周宗桂,吕新彪,等,2006.秦岭成矿带成矿特征和找矿方向.西北地质,39(2):156—178.

叶天竺,韦昌山,王玉往,2017.勘查区找矿预测理论与方法·各论.北京:地质出版社.

曾庆丰,1982.矿田构造发展特征.地质科学,17(1):47—56.

翟裕生,林新多,1993.矿田构造学.北京:地质出版社.

张世新,丁振举,姚书振,等,2019.西城矿田隐伏铅锌矿床成矿预测及实践.北京:地质出版社.

赵鹏大,2007.成矿定量预测与深部找矿.地学前缘,14(5):1—10.

赵鹏大,陈永清,1998.地质异常矿体定位的基本途径.地球科学,23(2):111—114.

赵新福,李占轲,赵少瑞,等,2019.华北克拉通南缘早白垩世区域大规模岩浆—热液成矿系统.地球科学,44(1):52—68.