

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.295>



热液矿床超大比例尺构造—蚀变—矿化填图： 基本原理与注意事项

郑 义^{1,2,3,4}

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东广州 510275
2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东广州 510275
3. 广东省地球动力与地质灾害重点实验室, 广东广州 510275
4. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东珠海 519000

摘要: 热液矿床超大比例尺填图是指 1:1 000 以及更大比例尺的填图, 主要用来记录矿区内露头、平硐、钻孔和手标本上等肉眼可直接观察到的各类地质现象。热液矿床超大比例尺填图的目的是查明成矿作用的地质特征、空间分布和时间演化, 对于准确判断热液矿床的成因类型和成矿过程, 以及圈定矿体和布置勘探工程等实践活动具有重要意义。在实际工作中, 初学者由于对热液矿床的复杂现象不知如何下手, 对于“填什么”和“如何填”等问题不甚清楚。鉴于此, (1) 从基本原理出发, 重点阐述了热液矿床构造、流体、蚀变和矿化形成过程, 提出“成矿流体+新鲜围岩→围岩蚀变+矿石”这一热液矿床形成的通用性公式, 并提出“构造→骨骼”和“蚀变→血肉”的类比; (2) 重点介绍了热液矿床超大比例尺填图过程中一些长期被忽略的问题, 如, 成矿环境判别、成矿流体通道与圈闭、热液充填与交代成矿作用以及脉体穿插与成矿期次判别等。同时, 对这些地质现象背后隐藏的成因启示做了重点阐释。

关键词: 热液矿床; 超大比例尺填图; 构造—蚀变—矿化; 流体通道与圈闭; 充填交代作用; 脉体; 矿床学。

中图分类号: P613

文章编号: 1000-2383(2022)10-3603-13

收稿日期: 2022-06-30

Large-Scaled Structure-Alteration-Mineralization Mapping of the Hydrothermal Deposits: Basic Principle and Precautions

Zheng Yi^{1,2,3,4}

1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource Survey, Guangzhou 510275, China
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamic and Geohazards, Guangzhou 510275, China
4. Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering, Zhuhai 519000, China

Abstract: Large-scale mapping of the hydrothermal deposits refers to the geological mapping with the scales of 1:1 000 and the larger scales, which is mainly used to record various geological phenomena that can be directly observed with the naked eye, such as outcrops, flat tunnels, boreholes and hand specimens in the mining area. The purpose of large-scale mapping is to identify the metallogenic characteristics, spatial distribution and temporal evolution of the hydrothermal deposits, which are useful for accurately constraining the genetic type and metallogenic process of hydrothermal deposits, as well as assisting further prospecting.

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(No.2021YFC2900300); 国家自然科学基金委优秀青年基金项目(No. 42022020).

作者简介: 郑义(1984—), 男, 教授, 博导, 主要从事成矿与资源勘查研究. ORCID: 0000-0002-7570-0146. E-mail: zhengyi43@mail.sysu.edu.cn

引用格式: 郑义, 2022. 热液矿床超大比例尺构造—蚀变—矿化填图: 基本原理与注意事项. 地球科学, 47(10): 3603—3615.

Citation: Zheng Yi, 2022. Large-Scaled Structure-Alteration-Mineralization Mapping of the Hydrothermal Deposits: Basic Principle and Precautions. *Earth Science*, 47(10): 3603—3615.

and exploration. In the field survey, the beginners do not know how to describe and record the complex phenomena of the hydrothermal deposits, and they are also not very clear about what to fill and how to map. To address these issues, we try to weaken the genetic type of the ore deposit from the basic principle, focusing on the formation process of the structure, fluid, alteration and mineralization of the hydrothermal deposit, and propose “ore-forming fluid + fresh wall rock \rightarrow wall rock alteration + ore” as a universal formula for the formation of hydrothermal deposits, and puts forward the analogies of “structure \rightarrow skeleton” and “alteration \rightarrow flesh”. In addition, we focus on some long-ignored aspects in the process of large-scale mapping of hydrothermal deposits, such as identification of metallogenic environment, ore-forming fluid channels and traps, hydrothermal filling and metasomatism, and identification of vein cross-cutting, etc. Furthermore, we eventual focus is on explaining the hidden genetic inspiration behind these geological phenomena.

Key words: hydrothermal deposits; large-scale mapping; structure-alteration-mineralization; fluid channels and traps; infilling and replacement; mineral deposits.

野外地质填图是地质学类专业的基本功之一(袁晏明等,2008;王涛等,2016),贯穿于地学工作者的整个职业生涯.本文所指的热液矿床“超大比例尺”填图是指对地表露头、平硐、钻孔和手标本上等记录的各类地质现象进行观察和描述.一方面,热液矿床超大比例地质填图是深入认识矿床地质特征、矿床成因类型和区域成矿规律的基础(方维萱,2016;陈衍景等,2020);另一方面,热液矿床超大比例地质填图的成果对于矿体—矿床—矿田乃至区域尺度的资源潜力评价和勘查工程部署也具有重要意义(杨志明等,2012;陈静等,2020).由于热液矿床具有分布广、成因类型多、成矿期次和空间分带复杂等特点(Pirajno,2009),在矿区尺度野外调查、填图和研究中,需要观察、描述和甄别的内容复杂,如岩性、构造、流体和蚀变等(池国祥和薛春纪,2011;陈正乐和陈柏林,2012).经典矿床学教材教学中(翟裕生等,2011),多倾向于按矿床成因类型对各类热液矿床的矿床地质特征、成矿过程和成矿模式分门别类进行介绍.这一系统分类对于快速掌握矿床学基础知识具有重要意义.但是,初学者为了将这些复杂的现象简单化,容易直接套用经典成矿模型,导致重要成矿信息的忽略和大量研究成果的同质化.

热液矿床超大比例尺地质填图的概念是什么?野外填图应该重点调查哪些内容?重点关注哪些地质现象?这些地质现象背后的成因启示是什么?笔者结合多年实践经验,对这些问题做了梳理,提出了热液矿床“超大比例尺”填图这一概念.“超大比例尺”是相对于测绘科学中的大比例尺而言,一般大比例尺是指1:10万甚至更大(叶天竺等,2014).而热液矿床中矿区范围一般在几平方千米,所要观察记录的现象一般是1:1000甚至更大比例尺下肉眼观察到的现象(宋明春等,2021).因此,我们认为热

液矿床超大比例尺填图应该从工作目的和科学问题出发,重点调查矿区内肉眼可见的构造、蚀变和矿化等关键特征.同时,需要掌握热液矿床成矿作用的基本原理,挖掘这些现象背后隐藏的成因启示,从而事半功倍达到工作目的.基于此,本文系统总结热液矿床构造—蚀变—矿化超大比例尺填图的基本概念和基本原理.同时,对容易混淆和理解困难的注意事项,例如成矿流体通道和圈闭、充填和交代作用以及热液脉体形成等,做了重点阐释.

1 矿床研究的尺度问题

空间尺度是热液研究中经常面临的问题(陈衍景等,2009;胡瑞忠等,2016;毛景文等,2020).为了形象直观和准确地反映矿区内地层、构造和岩浆岩等地质体的分布情况,常用等比例缩小的形式来比较准确地体现地质内容.其中,图件与实际区域的大小比例称为比例尺,又称缩尺.通常,小比例尺地质图覆盖范围相对较大,但测量精度较低,细节不突出(王功文等,2021);而大比例尺地质图表示的空间范围小,内容细致(宋明春等,2022).

热液矿床研究涉及到一系列的空间尺度,从宏观到微观包括:全球/板块 \rightarrow 成矿省/矿集区 \rightarrow 矿床/矿体 \rightarrow 矿石/矿物 \rightarrow 显微/超显微等.本文所讲的“超大比例尺”填图,大致相当于1:1000及更大比例尺,主要覆盖“矿床/矿体 \rightarrow 矿石/矿物”两个尺度(图1).在这一尺度下,主要工作场所是地表露头、探槽、平硐和钻孔等.研究者可以通过肉眼或放大镜直接进行观察、记录和描述.本文重点探讨的是直接通过野外观察,结合热液矿床的基本原理和形成过程,经过综合分析,得出一些重要的矿床成因启示.

以铅锌矿床及共伴生关键金属元素的研究为

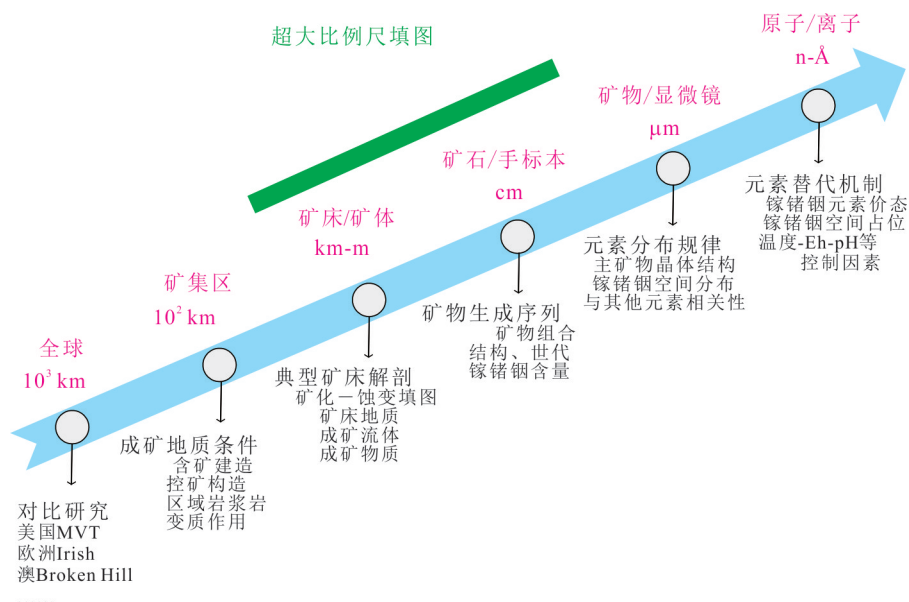


图 1 热液矿床研究中的空间尺度问题

Fig. 1 Spatial scales in the research of hydrothermal deposits

例(图 1),目前主要工作从宏观到微观主要包括“全球对比→矿集区→矿床/矿体→矿石/手标本→矿物/显微镜→原子/离子”等 6 个尺度(张长青等, 2013;周家喜等, 2021;刘英超等, 2022)。本文所指的“超大比例尺填图”重点关注的是在矿区露头、平硐和钻孔所直接观察到的各类构造、蚀变和矿化现象,重点查明这些现象的空间分布和时间演化。这项工作对于具体某个矿床的成因认识和矿床尺度的勘查工作具有重要意义。现代测试技术的进步,如各类遥感技术和原位微区测试技术,使得宏观和微观尺度的研究取得了显著进步。但是,野外观察和发现能力,尤其是基于野外调查的超大比例尺填图研究,反而更加薄弱了。因此,本文主要出发点是基于热液成矿作用的基本原理,从野外调查直接观察到的地质现象出发,来介绍这些现象背后的成因启示。

2 基本原理: $A+B \rightarrow C+D$

热液矿床成因类型具有多样,如斑岩型、矽卡岩型、造山型、VMS、SEDEX、MVT、卡林型和浅成低温热液型等。每一类热液矿床都具有独特的地质特征、矿物—元素组合、结构构造和控矿因素等。矿床成因类型的分类,对于快速高效掌握和集成表达矿床基本信息具有重要意义,也是现代矿床学研究中的巨大进步(李建威等, 2019)。但过度强调矿床成因类型,反而导致一些重要的成矿信息被忽略。实

际上,热液矿床的形成是一个非常复杂的过程,尤其是一些超大型矿床,成矿元素的巨量和超常富集是多因素耦合的结果,经历长时间、多期次的叠加富集形成,并在有利的构造部位完成矿体定位。那如何来系统表达这些复杂的成矿过程中元素富集?

复杂的现象和问题解决要从简单的原理入手。从原理上,无论哪一成因类型的热液矿床,一个成矿期或一个成矿阶段的成矿要素都可以用图 2 的通用性公式($A+B \rightarrow C+D$)表示。成矿过程可以被看作是一个复杂的化学反应过程,即携带着成矿元素的成矿流体沿着一定的通道与围岩反应,从而形成矿石和围岩蚀变带。其中,“A”指的是成矿流体,包括岩浆流体、变质流体、盆地卤水和大气降水等(卢焕章等, 2004);“B”指的是新鲜无蚀变的围岩,岩浆岩、沉积岩和变质岩均可作为容矿围岩;“C”指的是蚀变带,通常它们的分布范围要比矿体/矿石的范围要大;“D”指的是矿石,即有用元素和矿物达到可以开采利用的水平。此外,成矿流体通道也非常重要,常见的断层和褶皱等构造、沉积岩的孔隙、变质岩的片理面等,都是成矿流体运移和沉淀的绝佳通道。

有了这一认识,对于一些现象的观察和描述就需要分清主次,有的放矢。从空间上看,成矿流体携带着大量金属/成矿物质,沿着一定的流体通道运移,当运移到合适的位置,由于物理条件变化和化学反应等因素,从而导致成矿元素的溶解度急剧下

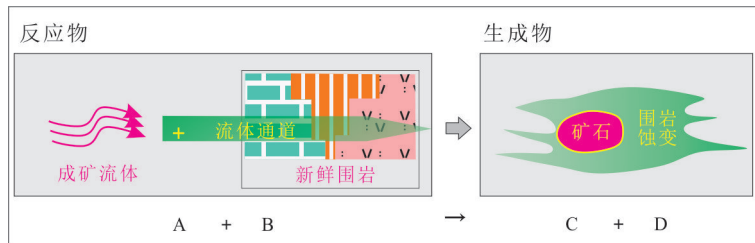


图2 热液矿床形成的基本原理(A+B→C+D)

Fig. 2 Basic principle for formation of the hydrothermal deposits(A+B→C+D)

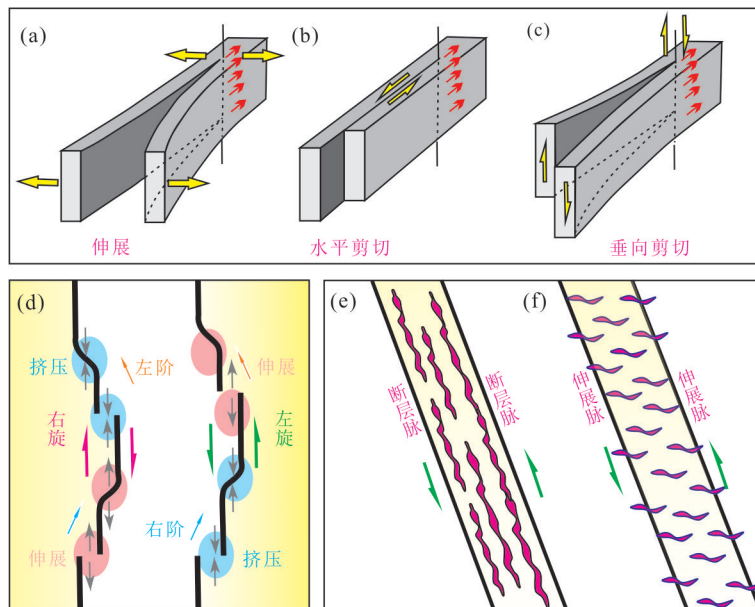


图3 热液矿床形成的构造条件

Fig. 3 Structural condition for formation of the hydrothermal deposits

a~c. 3种拉开成矿空间的构造,分别是伸展、水平剪切和垂向剪切;d. 同一应力场形成的挤压和伸展构造;e. 断层脉;f. 伸展脉

降,进而促进金属沉淀形成矿体/矿石.在具体矿床调查过程中,了解各类成矿元素的空间分布,对于理解矿床形成过程,尤其是布置找矿勘查工程,具有重要意义.在实际调查过程中,由于大规模的地质流体已经基本消耗殆尽,因此我们在一个矿床中实际观察到的是矿石(D)、蚀变带(C)、围岩(B)和部分的流体通道(主要是构造).如何通过残留的上述信息片段,推测和重建整个成矿过程,是超大比例尺填图和矿床成因研究的重要问题.

3 成矿构造:热液矿床的骨骼

成矿构造,又叫矿田构造,是指控制热液矿床矿体形态、产状、结构、规模以及形成和分布的地质构造要素的总和(翟裕生等,2004).成矿构造按照空间的大小分为不同尺度,例如板块构造属性、矿集区、矿田尺度、矿床尺度、矿体尺度和露头尺度等.

有些学者将成矿大地构造背景和成矿建造等宏观因素列为成矿构造要素(侯增谦等,2009;翟明国,2010).在本文所指的热液矿床超大比例尺填图中的成矿构造是指可以通过肉眼识别的中小尺度构造要素,尤其是矿体和露头尺度的构造.热液流体的运移需要一定的通道,尤其是断层构造常作为热液运移最重要的通道(图3).因此,我们认为成矿构造是热液矿床的“骨骼”.查明热液矿床“骨骼”(成矿构造)的几何学和动力学特征,是理解热液矿床元素富集过程和分带机制的基础.

通常来讲,成矿构造按照性质分为导矿构造、配矿构造和赋矿构造(翟裕生等,2004).除了通道作用,构造最主要的作用是能够为成矿提供大量的成矿空间.因此,应力薄弱位置是元素富集和矿体就位有利部位,例如背斜鞍部、层间滑脱带等(图3).这些构造应力薄弱部位往往是通过伸展和剪切作

用所形成(图 3a~3c)。其中,需要重点强调的是“旋”和“阶”的区别。顺时针相对运动,称之为左旋;反之,逆时针相对运动称之为右旋。面向矿体,升高一侧位于左侧称为左阶,而升高一侧位于右侧称为右阶(图 3d)。因此,左旋左阶和右旋右阶等伸展环境是矿体就位的主要部位(图 3d)。

除了要查明热液矿床控矿构造的几何学形态,对其运动学和动力学机制的研究以及应力场的反演也是成矿构造解析的重要内容。热液矿床大比例尺填图中,常见热液脉的成因包括断层脉和伸展脉两类(图 3e~3f)。其中,断层脉通常平行于断裂带或剪切带,并发育多组平行脉体。断裂脉内常包含一些定向拉长的围岩物质组成碎裂—愈合脉体。断裂脉的总体方向常平行或小角度相交于断裂带或剪切带。脉体内矿物结构构造多与整个脉体方向平行,有时候会呈现复杂的雁列、折尾和菱形结环等现象(图 3e)。与之相对的是伸展脉,个体短而弯曲,表现出裂面不平和不规则错开,疏密不规则(代表了应力集中处一张节理密集)。伸展脉体常以中高角度与断裂带或剪切带总体方向相交,与应变椭圆最大应力方向斜交。此外,部分伸展脉发育在断裂或剪切带外侧(图 3f)。

4 围岩蚀变:热液矿床的血肉

围岩蚀变,又叫热液蚀变,是指围岩发生的矿物、化学成分和结构构造的变化(胡受奚等,2004)。准确理解蚀变现象背后的地质成因指示,不但对于解决矿床成因和找矿勘查问题具有重要意义(杨志明等,2008;唐菊兴等,2016),也是后续代表性样品的挑选和测试分析的关键。因此,在观察描述围岩蚀变时,要区分哪些蚀变与成矿作用有关,哪些与成矿无关。本部分重点介绍围岩蚀变的概念、描述方法、影响因素和观察描述的要点等。

如何来描述蚀变作用?总体原则是清晰、准确和一致。围岩蚀变的表达方式通常有3种方式。第1种是基于矿物组成的描述,例如石英、钠长石、绢云母和钾长石等;第2种是基于化学组成的描述,例如钾化、硅化、钙化、钠化和镁化等;第3种是基于成因的描述,例如,青磐岩化、绢英岩化、云英岩化和泥化等。其中,基于化学组成和基于成因的蚀变描述需要对矿物化学成分和成因有扎实的知识背景,入门较难,因此我们推荐基于矿物或矿物组合的蚀变描述。命名蚀变岩的方法有两种,一种是蚀变较弱,

常命名为某某蚀变化原岩,类似于变质岩中的“变余”,例如棉花坑铀矿的水云母化花岗岩;另一类是围岩蚀变强烈,基本是由蚀变矿物组成,命名为某某蚀变矿物岩石,类似于变质岩中的“变成”,例如石碌铁矿的透辉石透闪石岩。

影响蚀变作用的因素很多,不同学者总结的也略有差异(图 4, Corbett and Leach, 1998)。我们基于经验,提出了5个影响因素,分别是温度、渗透率、压力、围岩组成和流体性质。其中,温度是影响热液蚀变最重要的因素,因为大部分化学反应需要较高的温度来提供能量。渗透率控制了成矿流体进入和通过围岩的能力。通常致密岩石具有较低的渗透率,由于不透水,往往只发生轻微蚀变。压力并不是蚀变作用发生的直接因素,但压力往往控制了地质深度,超压控制了流体迁移,降压导致流体沸腾和成矿物质沉淀。原始围岩的组成决定了元素与矿物反应的有效性。通常,流体与造岩矿物反应的难易程度,往往与鲍温反应序列的矿物结晶方向相反。最后,流体的组成和性质(如,氧化还原程度、酸碱度、挥发分组成和阴阳离子组成等)对于热液矿床围岩蚀变的形成也具有重要影响。

那如何来观察描述围岩蚀变?首先是矿物组成,包括矿物种类和组合等;其次是蚀变结构构造,如浸染状、选择性矿物交代和充填脉体等。尤其是重点观察蚀变作用是均匀还是不均匀分布,是普遍分布还是沿片理或断裂等局部构造分布等;第三是蚀变强度方面,通常划分为蚀变微弱、中度和强烈等多个强度级别;第四是围岩蚀变的空间分布,除了垂向和水平的蚀变分布,还需要注意近矿和远矿蚀变;第五是时间因素。野外调查常通过脉体穿插、交代反应和包裹等关系判断蚀变形成的相对时间。

5 矿石:一种特殊的围岩蚀变

成矿作用的最终产物是矿石,由矿石矿物和脉石矿物组成。其形成过程可理解为成矿元素经过富集达到经济品位,最根本原因是金属元素或金属元素络合物因为溶解度的降低而发生沉淀(顾雪祥等,2019;Li *et al.*, 2021)。因此,溶解度的影响因素是解析矿床沉淀机制的根本。深刻理解各类元素的元素溶解/沉淀相图,尤其是常见的 Au、Cu、Pb、Zn 和 Ag 金属离子,是掌握矿化沉淀机制的核心。金属离子往往与阴离子组成络合物溶解在水里,其溶解度的变化决定了金属迁移还是沉淀富集。溶解度的

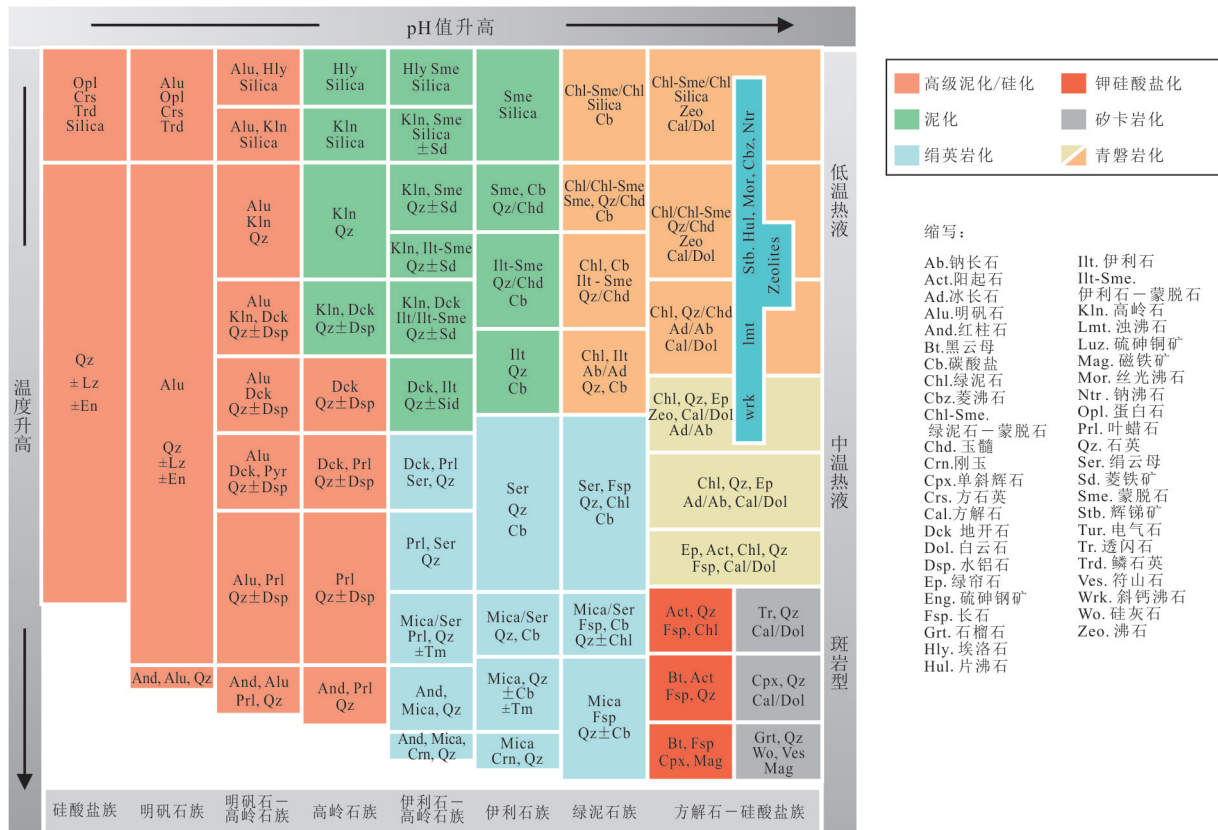


图 4 热液矿床常见的围岩蚀变组合及指示的成矿条件(据 Corbett and Leach, 1998 修改)

Fig. 4 Mineral assemblages and their forming condition of alteration in the hydrothermal deposits (modified after Corbett and Leach, 1998)

大小,是成矿流体的温度、盐度、压力、pH 值以及络合物种类的函数.这里,我们介绍了常见脉石矿物石英和方解石以及金铜铅锌硫化物的溶解度影响因素(图 5).

5.1 石英和方解石

石英和方解石溶解度与热液的温度、盐度、挥发分组成和压力有关(图 5a, Barnes, 2015).通常,高温流体与大气降水的混合和稀释作用导致了体系温度下降和大量石英的沉淀.另外,高压条件下,压力的骤降导致石英溶解度急剧降低,从而大量石英沉淀.斑岩矿床中大量细脉浸染状的热液网脉的形成主导因素就是大气降水混合和流体压力降低.此外,方解石大量沉淀一个非常重要的因素是富含 HCO_3^- 流体中 CO_2 逸失,导致流体中 CO_2 偏分压降低.

5.2 金铜铅锌硫化物

温度、pH、氧逸度和硫逸度是影响这些金属沉淀的重要因素(图 5b~5d, Corbett and Leach, 1998; Barnes, 2015).其中,温度是影响金属溶解度最重要的因素.铜和金元素在中高温流体主要与 Cl^- 络合,

在低温流体中多与 HS^- 络合.中高温时,热液温度降低,铜和金的络合物溶解度降低,导致矿石矿物沉淀;低温时,热液温度减低,铜和金的溶解度反而升高.锌的溶解度与温度成正比,当体系温度降低时,锌络合物溶解度降低.pH 值也是影响溶解度的重要因素.金铜铅锌的溶解度与 pH 成反比,越酸性条件下,金铜铅锌的溶解度越大.对于金, $\text{pH} < 4$ 时,体系越酸性,金的溶解度越大.碱性条件下,铜和金的溶解度有波动,但在 $\text{pH} = 8$ 时溶解度最大.氧逸度总体与溶解度成正比,氧逸度越高,金属溶解度越高.很多情况下,热液系统冷却和稀释等综合作用是导致矿石矿物大规模沉淀的原因.

5.3 成矿元素的分带性

元素的这些溶解-沉淀行为导致了成矿系统的元素分带(Corbett and Leach, 1998).例如,在低硫化状态下,以 Cl^- 络合的成矿元素往往表现出 $\text{Cu} \rightarrow \text{Fe} \rightarrow \text{Zn} \rightarrow \text{Pb}$ 的分带性,以 HS^- 络合的成矿元素往往表现出 $\text{Au} \rightarrow \text{Au} \rightarrow \text{As} \rightarrow \text{Au} \rightarrow \text{Sb}$ 的元素分带.很多时候,由于氧化还原状态和 pH 值的变化,往往表现出 $\text{Ag} \rightarrow \text{Au}$ 和 $\text{As} \rightarrow \text{Sb}$ 的元素分带性.

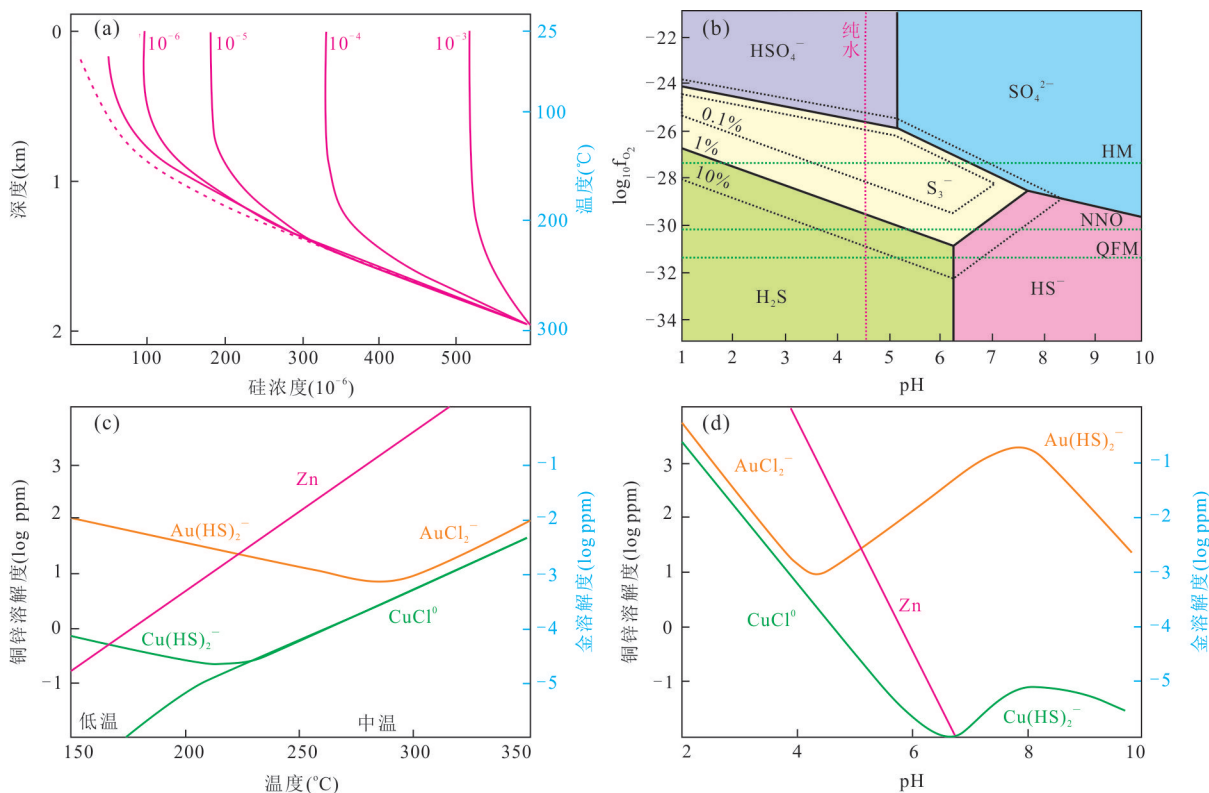


图 5 热液矿床主要矿物沉淀的控制因素

Fig. 5 Controls on mineral precipitation in the hydrothermal deposits

a. 脉石矿物石英溶解度与深度和温度的相图(据 Barnes, 2015 修改); b. 不同 pH 和 Eh 条件下, 热液中硫的稳定区间(据 Barnes, 2015 修改); c. 铜、金和锌的溶解度与温度的关系(据 Corbett and Leach, 1998 修改); d. 铜、金和锌的溶解度与酸碱度的关系(据 Corbett and Leach, 1998 修改)

在高硫化状态下, 成矿流体往往以 Cl⁻ 来运移金属离子. 一般酸性条件下, Zn 和 Pb 由于冷却和稀释等原因发生大量沉淀; 极度酸性条件下, 往往表现出 Cu→Cu-Au-As→Au-As-Sb-Te 的元素分带. 花岗岩体的元素分带性就是由上述因素所控制.

6 几个值得注意的问题

6.1 成矿环境的判别

成矿环境的判别是热液矿床研究中常遇到的问题(孙卫东等, 2010; 周涛发等, 2017; 秦克章等, 2017), 这里的成矿环境包括物理环境和化学环境两方面.

物理环境是指受机械应力作用的情况, 常见的物理环境包括挤压环境、伸展环境和挤压向伸展转换等环境(范宏瑞等, 2005; 邓军等, 2006; Hu *et al.*, 2020; Cao *et al.*, 2021). 一般来讲, 挤压环境中, 表现出一些角砾状、团块状、碎裂状、石香肠、拔丝构造、揉皱、构造透镜体等应力和变形的结构构造, 矿物多呈机械破碎、波状消光和细粒化等特征. 而伸

展环境下, 矿物多呈一些晶簇状、皮壳状、梳状、自形晶体等, 指示形成于开放环境. 造山型金矿的矿石矿物沉淀多发生在挤压向伸展转换的环境, 以烟灰色、富含硫化物的平直脉体为代表特征. 尤其是高品位矿石, 多表现出“挤压→伸展→挤压→伸展→……”反复交替的现象. 多期次热液叠加和大量的元素卸载沉淀, 造成了局部品位异常高的矿石类型, 典型矿床实例为雪峰山地区的铋金矿床(刘飏等, 2021; Li *et al.*, 2022).

化学环境包括温度、pH 值、Eh 值和组分等因素(杜乐天, 2001; 倪培等, 2020), 可通过超大比例尺填图观察到的矿物及矿物组合来指示. 同时, 特定的矿物和矿物组合也是化学环境的反应. 前人已有大量的相关研究, 这里我们推荐温度—酸碱度图解(图 4, Corbett and Leach, 1998). 例如, 低温酸性条件下, 硅主要以蛋白石、方石英、鳞石英的形式存在. 蛋白石的出现标志着低温、酸性的成矿条件. 此外, 低温碱性条件下容易形成绿泥石、蒙脱石、沸石、方解石和白云石等矿物组合. 高温酸性条件下, 形成

明矾石、红柱石、石英矿物组合。高温碱性条件下,形成钾长石、硅灰石、石榴石、磁铁矿等矿物组合。中温中等酸碱度条件下,容易形成高岭石、伊利石、地开石、绢云母等矿物组合。

需要注意的是,热液矿床形成的物理和化学条件并不是完全分开的(Zheng *et al.*, 2022)。很多时候,我们在超大比例尺填图所观察到的蚀变-矿化现象是物理因素和化学因素共同作用和相互促进的产物。

6.2 流体通道与圈闭的判别

流体通道和流体圈闭在油气资源的研究和评价中广泛关注的內容(卢焕章等,2004)。实际上,热液矿床中也是携带着大量成矿元素的流体沿着一定的通道运移,当遇到合适的条件会大量卸载成矿元素,而无用组分继续运移,从而导致形成围岩蚀变带和矿化现象(图6)。因此,热液矿床超大比例尺填图中对热液运移的通道和圈闭层的识别,将会对热液矿床成矿作用的解析和找矿勘探具有重要意义。

良好的流体通道具有以下特点:①规模大,切穿性强;②长期活动;③几何形态结构复杂;④能够携带高通量成矿流体。野外直接识别流体通道是一件非常困难的事情,主要原因包括:①这些流体通道可能是不连续、不可见的;②很多时候受断裂控制的蚀变-矿化是水岩反应平衡的产物,已经全部反应完全并表现出均一化;③流体通道往往是不规则状,并发生了多期次的流体缓冲和愈合;④构造-蚀变-矿化沿走向和倾向上有很大变化,规律复杂;⑤流体通道很多时候表现出不和谐的特点,如狭窄的通道却伴随着巨大的蚀变带。以碳酸盐岩容矿的铅锌矿为例,一些大型高品位的铅锌矿的形成显然需要巨量的流体沿着一定通道来运移成矿流体,但由于碳酸盐矿物极易发生溶解再沉淀,导致流体通道的识别非常困难(Taylor *et al.*, 2009)。

携带着大量金属的热液运移到一定的部位,由于物理和化学的圈闭作用,导致成矿元素大量卸载,从而形成矿体。这一过程中,非常重要的一个概念是流体圈闭(图6)。流体圈闭按照性质和作用分为化学圈闭和物理圈闭两种。常见的化学圈闭多是一些化学活动性较强的岩石,如碳酸盐岩、蒸发岩系、黑色页岩、富硫化物页岩和红层等。常见的物理圈闭物理性质突变带,如不透水地层可以作为阻隔层。此外,断裂交汇、断裂膨大、脆性断裂和褶皱鞍

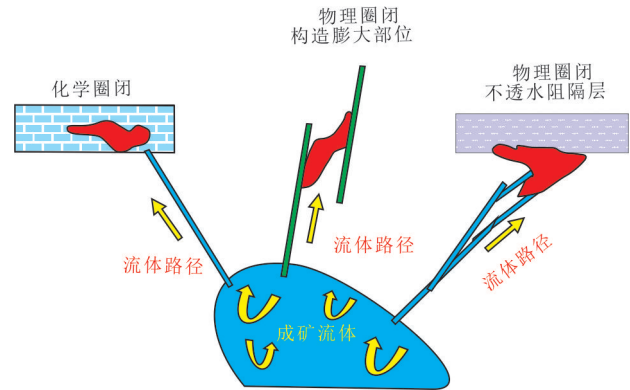


图6 热液矿床中流体通道与流体圈闭的示意图

Fig.6 Schematic diagram of fluid channels and traps in the hydrothermal deposits

部等。这些构造薄弱区域,由于伸展形成低压区,导致相对高压的成矿流体携带着成矿元素进入并发生卸载沉淀而成矿。

6.3 充填与交代作用的判别

充填和交代作用也是热液矿床中常见的成矿作用,准确识别充填和交代作用对于热液矿床圈定矿体、估算品位和资源量以及设计采矿工程等具有重要意义(图7,顾雪祥等,2019)。

充填脉体特征包括(图7a):①脉体切穿围岩;②斜向切穿构造;③脉体靠近围岩两侧矿物颗粒较细,而脉体内部表现出粗粒特征;④通常发育一些不规则空洞;⑤矿石矿物表现出梳状、胶状、皮壳状结构或对称条纹。此外,在超大比例尺填图过程中,要注意观察矿物粒度、颜色和结构等的变化规律,这些信息也可以用来辅助判断。

交代脉体也是一种常见的成矿作用形式,主要特征包括(图7b):①通常会发生矿物选择性交代现象,大量的交代残余“港湾”、“孤岛”、矿物交代假相、变斑晶结构和残留矿物相的存在指示了交代反应的发生;②脉体形态变化很大并表现出围岩、蚀变和脉体的边界模糊,通常会发育靠近新鲜围岩的蚀变前锋;③交代脉体常会发育大量的叠加结构,期次较为复杂;④一些特殊的矿物结构构造也可以用来指示交代反应的发生,如尖牙和龇齿结构等。

6.4 断裂与脉体形成过程

最后,笔者来讨论一下断裂和热液脉体的关系。尽管热液脉在热液矿床中广泛分布,脉体穿插关系也是最常用和最可靠的成矿期次判断依据。热液脉体是热液矿床中大规模流体活动的直接记录,在成矿中非常重要。热液脉体的规模变化较大,大的可

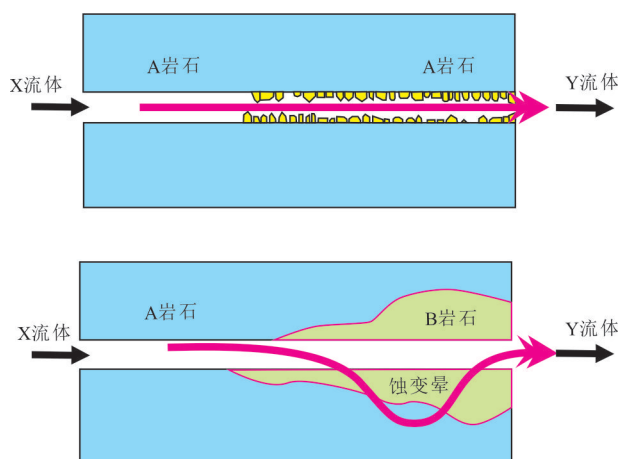


图7 热液矿床中充填成矿作用和交代成矿作用的示意
Fig.7 Schematic diagram of infilling and replacement mineralization in the hydrothermal deposits

到几千米,小的只能在几厘米.在热液矿床超大比例尺填图中,我们可以通过脉体矿物组合和流体包裹体显微测温等手段限定成矿流体的成因和来源(卢焕章等,2004;池国祥和薛春纪,2011).此外,我们还可以通过热液脉体几何形态、产状和应力特征来判断热液矿床的构造机制,从而揭示多期构造—热液活动的性质.

实际上,热液脉体的形成包括3个重要的过程:“裂隙打开、形成空间”→“流体流经、保持张开”→

“矿物沉淀、形成脉体”(图 8a~8c).在这种情况下,我们常用的切割律(即老的脉体被新的脉体切割),可能存在问题,因此需要特别注意热液脉体中矿物的分布情况(图 8d~8f).例如,要判断图 8d 中 A、B 和 C 三组脉体的先后关系,如果内部矿物如 8e 所示,则指示 A 和 B 脉被 C 脉切穿;如果内部矿物如 8f 所示,则指示 A、B 和 C 三组脉体同时形成.

另外一个需要关注的问题是,我们对局部脉体穿插的观察是有局限性的.要想准确判别先后关系,一方面观察的范围要扩大,尽量找出蚀变—矿化带的边界(图 8g~8h);另一方面,很多时候我们观察到的是二维平面,很多看似有先后关系脉体放在三维空间观察会发现是同时关系.

7 结论

(1)热液矿床超大比例尺填图是指 1:1 000 及更大比例尺的填图,主要是记录露头、平硐、钻孔和手标本上通过肉眼直接观察到的各类地质现象;

(2)热液矿床的形成过程可用公式“成矿流体+新鲜围岩→围岩蚀变+矿石”来表示,并提出“构造→骨骼”和“蚀变和矿化→血肉”的类比;

(3)成矿环境判别、流体通道与圈闭、充填与交代和断裂—脉体形成等是矿床研究中长期忽略的问题,在超大比例尺填图过程中需要谨慎对待.

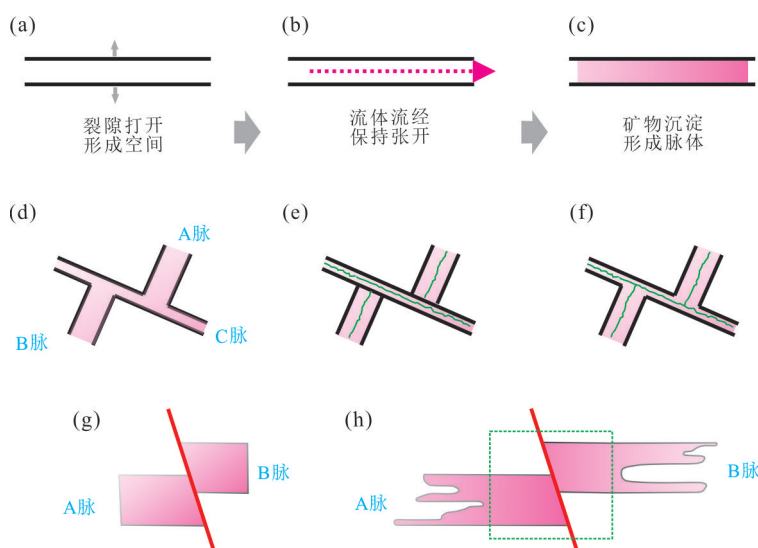


图8 热液矿床中脉体的形成过程与先后顺序判别

Fig.8 The formation process and sequences of various veins in hydrothermal deposits

a~c. 脉体形成的三部曲,裂隙打开、形成空间→流体流经、保持张开→矿物沉淀、形成脉体;d. A、B 和 C 脉的切穿关系;e. C 脉晚于 A 脉和 B 脉;f. C 脉与 A 脉和 B 脉同时形成;g. A 脉、B 脉和断裂的切穿关系;h. A 脉和 B 脉通过充填交代作用同时形成

致谢:谨以此文祝贺中国地质大学(武汉)70周年校庆!笔者毕业于该校资源学院资源勘查工程基地班(020041班).学习和工作中受到资源系诸位老师的谆谆教诲,在此感谢姚书振、丁振举、周宗桂、李建威、蒋少涌和张晓军等教授的传道授业解惑.李占轲、熊索菲、江满容和史冠中等同窗好友已成长为地大资勘教学和科研的中坚力量,与本人经常讨论相关的学术问题,使我受益匪浅.感谢《地球科学》邀稿,鼓励我撰写这样一篇探讨热液矿床大比例尺填图思路和方法的学术论文.论文学术思想受到加拿大萨省地调局学术沙龙的启发,与Thomas David的多次讨论使作者很多问题明了化.这篇论文与其说是一篇学术论文,倒不如说是笔者多年学习和研究热液矿床的心得体会.文中许多学术观点参考了许多前人的研究,笔者尽量按照学术规则进行了一一引用,如果未能提及和准确引用,在此表示歉意.两位审稿人的建设性意见极大提高了本文的学术质量,在此表示感谢!

References

- Barnes, H. L., 2015. Hydrothermal Processes. *Geochemical Perspectives*, 4(1): 1–93. <https://doi.org/10.7185/geochempersp.4.1>
- Cao, R., Ma, X.H., Bagas, L., et al., 2021. Late Jurassic Intra-continental Extension and Related Mineralisation in Southwestern Fujian Province of SE China: Insights from Deformation and Syn-Tectonic Granites. *Journal of Earth Science*, 32(1): 158–173. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1387-6>
- Chen, Y.J., Li, N., Deng, X.H., et al., 2020. Geology and Geochemistry of Molybdenum Deposits in the Qinling Orogen, P.R. China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Chen, J., Zhou, T.F., Zhang, L.J., et al., 2020. A Discussion of Characteristics, Genesis of Lithocaps and Their Distributions in South China. *Acta Petrologica Sinica*, 36(11): 3380–3396(in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. J., Zhai, M. G., Jiang, S. Y., 2009. Significant Achievements and Open Issues in Study of Orogenesis and Metallogenesis Surrounding the North China Continent. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2695–2726(in Chinese with English abstract).
- Chen, Z.L., Chen, B.L., 2012. Thinking, Steps and Practice of Research on Ore-Field Structure in Geomechanics. *Chinese Journal of Nature*, 34(4): 208–215(in Chinese with English abstract).
- Chi, G.X., Xue, C.J., 2011. Principles, Methods and Applications of Hydrodynamic Studies of Mineralization. *Earth Science Frontiers*, 18(5): 1–18(in Chinese with English abstract).
- Corbett, G. J., Leach, T. M., 1998. Southwest Pacific Rim Gold–Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization. *Society of Economic Geologists*, 6. <https://doi.org/10.5382/SP.06>
- Deng, J., Yang, L.Q., Ge, L.S., et al., 2006. Research Progress on Structural System of Jiaodong Ore Concentration Area. *Progress in Natural Science*, 16(5): 513–518(in Chinese with English abstract).
- Du, L. T., 2001. Basic Metallogenic Regularity and General Hydrothermal Metallogeny of Hydrothermal Uranium Deposits in China. Atomic Press, Beijing(in Chinese).
- Fan, H.R., Hu, F.F., Yang, J.H., et al., 2005. Fluid Evolution and Large-Scale Gold Metallogeny during Mesozoic Tectonic Transition in the Eastern Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1317–1328(in Chinese with English abstract).
- Fang, W. X., 2016. On Tectonic System of Hydrothermal Breccia: Objective, Methodology and Lithofacies-Mapping Applications. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(2): 237–265(in Chinese with English abstract).
- Gu, X.X., Li, B.H., Zhang, Y.M., et al., 2019. Methodology and Applications of Metallogeny Research. China Geologic Press, Beijing (in Chinese).
- Hou, Z.Q., Yang, Z.M., 2009. Porphyry Deposits in Continental Settings of China: Geological Characteristics, Magmatic-Hydrothermal System, and Metallogenic Model. *Acta Geologica Sinica*, 83(12): 1779–1817(in Chinese with English abstract).
- Hu, S.X., Ye, Y., Fang, C.Q., 2004. Petrology of Metasomatic Altered Rocks and Its Prospecting Significance. China Geologic Press, Beijing (in Chinese).
- Hu, H.L., Liu, S.L., Fan, H.R., et al., 2020. Structural Networks Constraints on Alteration and Mineralization Processes in the Jiaojia Gold Deposit, Jiaodong Peninsula, China. *Journal of Earth Science*, 31(3): 500–513. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1276-z>
- Hu, R.Z., Fu, S.L., Xiao, J.F., 2016. Major Scientific Problems on Low-Temperature Metallogenesis in South China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11): 3239–3251(in Chinese with English abstract).

- nese with English abstract).
- Li, H., Zhu, D.P., Shen, L.W., et al., 2022. A General Ore Formation Model for Metasediment-Hosted Sb- (Au-W) Mineralization of the Woxi and Banxi Deposits in South China. *Chemical Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.121020>
- Li, J.W., Zhao, X.F., Deng, X.D., et al., 2019. An Overview of the Advance on the Study of China's Ore Deposits during the last Seventy Years. *Scientia Sinica (Terrae)*, 49(11): 1720—1771(in Chinese with English abstract).
- Li, Z.K., Li, X.M., Jin, X.Y., et al., 2021. Age and Genesis of the Laodaizhanggou Pb-Zn-Ag Deposit in the Fudian Ore Field, Southern North China Craton: Implications for Regional Mineral Prospecting. *Journal of Earth Science*, 32(1): 195—207. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1093-4>
- Liu, B., Wu, Q.H., Li, H., et al., 2021. Yanshanian NE-Striking Fault Evolution and Its Implications on Mineralization in the Xitian W-Sn Polymetallic Ore Field, Hunan Province. *Earth Science*, 46(1): 43—58(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.C., Hou, Z.Q., Yue, L.L., et al., 2022. Critical Metals in Sediment-Hosted Pb-Zn Deposits in China. *Chinese Science Bulletin*, 67(4): 406—424(in Chinese with English abstract).
- Lu, H.Z., Fan, H.R., Ni, P., et al., 2004. Fluid Inclusion. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Mao, J.W., Wu, S.H., Song, S.W., et al., 2020. The World-Class Jiangnan Tungsten Belt: Geological Characteristics, Metallogeny, and Ore Deposit Model. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3746—3762(in Chinese with English abstract).
- Ni, P., Chi, Z., Pan, J.Y., 2020. An Integrated Investigation of Ore-Forming Fluid Evolution in Porphyry and Epithermal Deposits and Their Implication on Exploration. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 60—78(in Chinese with English abstract).
- Pirajno, F., 2009. Hydrothermal Processes and Mineral System. Springer, Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8613-7>
- Qin, K.Z., Zhai, M.G., Li, G.M., et al., 2017. Links of Collage Orogenesis of Multiblocks and Crust Evolution to Characteristic Metallogenesis in China. *Acta Petrologica Sinica*, 33(2): 305—325(in Chinese with English abstract).
- Song, S.M., Wen, G.J., Shen, W.J., et al., 2021. Specification for Geological Mapping of Solid Mineral Exploration. China Geologic Press, Beijing (in Chinese).
- Song, M.C., Ding, Z.J., Liu, X.D., et al., 2022. Structural Controls on the Jiaodong Type Gold Deposits and Metallogenic Model. *Acta Geologica Sinica*, 96(5): 1774—1802(in Chinese with English abstract).
- Sun, W.D., Ling, M.X., Yang, X.Y., et al., 2010. Ridge Subduction and Porphyry Copper-Gold Mineralization. *Scientia Sinica (Terrae)*, 40(2): 127—137(in Chinese with English abstract).
- Tang, J.X., Song, Y., Wang, Q., et al., 2016. Geological Characteristics and Exploration Model of the Tiegelongnan Cu(Au-Ag) Deposit: The First Ten Million Tons Metal Resources of a Porphyry-Epithermal Deposit in Tibet. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(6): 663—690(in Chinese with English abstract).
- Taylor, R.D., Leach, D.L., Bradley, D.C., 2009. Compilation of Mineral Resource Data for Mississippi Valley-Type and Clastic-Dominated Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits. U.S. Geological Survey Open-file Report 2009—1297.
- Wang, G.W., Zhang, Z.Q., Li, R.X., et al., 2021. Resource Prediction and Assessment Based on 3D/4D Big Data Modeling and Deep Integration in Key Ore Districts of North China. *Scientia Sinica (Terrae)*, 51(9): 1594—1610(in Chinese with English abstract).
- Wang, T., Ji, W.H., Hu, J.M., et al., 2016. Geological Mapping for Special Issues and a Discussion on Related Topics. *Geological Bulletin of China*, 35(5): 633—641(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z.M., Hou, Z.Q., Song, Y.C., et al., 2008. Qulong Superlarge Porphyry Cu Deposit in Tibet: Geology, Alteration and Mineralization. *Mineral Deposits*, 27(3): 279—318(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z.M., Hou, Z.Q., Yang, Z.S., et al., 2012. Application of Short Wavelength Infrared(SWIR) Technique in Exploration of Poorly Eroded Porphyry Cu District: A Case Study of Niancun Ore District, Tibet. *Mineral Deposits*, 31(4): 699—717(in Chinese with English abstract).
- Ye, T.Z., Lv, Z.C., Pang, Z.S., et al., 2014. Theory and Methodology of Prospecting Prediction in Exploration Area. China Geologic Press, Beijing (in Chinese).
- Yuan, Y.M., Zhao, W.X., Zhang, Z.J., et al., 2008. Teaching

- System and Content of Geological Field Practice in Zhou Koudian. *Chinese Geological Education*, 17(2): 61–66 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y.S., Peng, R.M., Xiang, Y.C., et al., 2004. Methodology of Regional Metallogenic Research. China Land Press, Beijing (in Chinese).
- Zhai, Y.S., Yao, S.Z., Cai, K.Q., 2011. Metalogeny (Third Edition). China Geologic Press, Beijing (in Chinese).
- Zhai, M.G., 2010. Tectonic Evolution and Metallogenesis of North China Craton. *Mineral Deposits*, 29(1): 24–36 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C.Q., Rui, Z.Y., Chen, Y.C., et al., 2013. The Main Successive Strategic Bases of Resources for Pb–Zn Deposits in China. *Geology in China*, 40(1): 248–272 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y., Zhang, G.Z., Wu, Y.H., 2022. Triassic Multistage Antimony–Gold Mineralization in the Precambrian Sedimentary Rocks of South China: Insights from Structural Analysis, Paragenesis, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Age, In-Situ S–Pb Isotope and Trace Elements of the Longwangjiang–Jiangdongwan Orefield, Xuefengshan Mountain. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105030>
- Zhou, J.X., Luo, K., Sun, G.T., 2021. Se Extremely Enriched in the Dingtoushan Pb–Zn Deposit, Qinglong City, Guizhou Province, China. *Geology in China*, 48(1): 339–340 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, T.F., Fan, Y., Wang, S.W., et al., 2017. Metallogenic Regularity and Metallogenic Model of the Middle–Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 33(11): 3353–3372 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈静, 周涛发, 张乐骏, 等, 2020. 蚀变岩帽的特征、成因以及在华南的分布探讨. *岩石学报*, 36(11): 3380–3396.
- 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌, 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题. *岩石学报*, 25(11): 2695–2726.
- 陈衍景, 李诺, 邓小华, 等, 2020. 秦岭造山带铅矿床成矿规律. 北京: 科学出版社.
- 陈正乐, 陈柏林, 2012. 地质力学矿田构造研究思路、步骤与实践. *自然杂志*, 34(4): 208–215.
- 池国祥, 薛春纪, 2011. 成矿流体动力学的原理、研究方法及应用. *地学前缘*, 18(5): 1–18.
- 邓军, 杨立强, 葛良胜, 等, 2006. 胶东矿集区形成的构造体制研究进展. *自然科学进展*, 16(5): 513–518.
- 翟明国, 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用. *矿床地质*, 29(1): 24–36.
- 翟裕生, 彭润民, 向运川, 等, 2004. 区域成矿研究法. 北京: 中国大地出版社.
- 翟裕生, 姚书振, 蔡克勤, 2011. 矿床学(第三版). 北京: 地质出版社.
- 杜乐天, 2001. 中国热液铀矿基本成矿规律和一般热液成矿学. 北京: 原子能出版社.
- 范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 等, 2005. 胶东中生代构造体制转折过程中流体演化和金的大规模成矿. *岩石学报*, 21(5): 1317–1328.
- 方维萱, 2016. 论热液角砾岩构造系统及研究内容、研究方法和岩相学填图应用. *大地构造与成矿学*, 40(2): 237–265.
- 顾雪祥, 李葆华, 章永梅, 等, 2019. 矿床学研究方法与应用. 北京: 地质出版社.
- 侯增谦, 杨志明, 2009. 中国大陆环境斑岩型矿床: 基本地质特征、岩浆热液系统和成矿概念模型. *地质学报*, 83(12): 1779–1817.
- 胡瑞忠, 付山岭, 肖加飞, 2016. 华南大规模低温成矿的主要科学问题. *岩石学报*, 32(11): 3239–3251.
- 胡受奚, 叶瑛, 方长泉, 2004. 交代蚀变岩岩石学及其找矿意义. 北京: 地质出版社.
- 李建威, 赵新福, 邓晓东, 等, 2019. 新中国成立以来中国矿床学研究若干重要进展. *中国科学: 地球科学*, 49(11): 1720–1771.
- 刘飏, 吴玺虹, 李欢, 等, 2021. 湖南锡田钨锡多金属矿田燕山期 NE 向断层演化历史及其成矿意义. *地球科学*, 46(1): 43–58.
- 刘英超, 侯增谦, 岳龙龙, 等, 2022. 中国沉积岩容矿铅锌矿床中的关键金属. *科学通报*, 67(4): 406–424.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等, 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社.
- 毛景文, 吴胜华, 宋世伟, 等, 2020. 江南世界级钨矿带: 地质特征、成矿规律和矿床模型. *科学通报*, 65(33): 3746–3762.
- 倪培, 迟哲, 潘君屹, 2020. 斑岩型和浅成低温热液型矿床成矿流体与找矿预测研究: 以华南若干典型矿床为例. *地学前缘*, 27(2): 60–78.
- 秦克章, 翟明国, 李光明, 等, 2017. 中国陆壳演化、多块体拼合造山与特色成矿的关系. *岩石学报*, 33(2): 305–325.

- 宋明春,丁正江,刘向东,等,2022.胶东型金矿床断裂控矿及成矿模式.地质学报,96(5):1774—1802.
- 宋明春,温桂军,申文金,2021.中华人民共和国地质矿产行业标准固体矿产勘查地质填图规范DZ/T0382-2021.北京:地质出版社.
- 孙卫东,凌明星,杨晓勇,等,2010.洋脊俯冲与斑岩铜金矿成矿.中国科学:地球科学,40(2):127—137.
- 唐菊兴,宋扬,王勤,等,2016.西藏铁格隆南铜(金银)矿床地质特征及勘查模型:西藏首例千万吨级斑岩—浅成低温热液型矿床.地球学报,37(6):663—690.
- 王功文,张智强,李瑞喜,等,2021.华北重点矿集区大数据三维/四维建模与深层次集成的资源预测评价.中国科学:地球科学,51(9):1594—1610.
- 王涛,计文化,胡建民,等,2016.专题地质填图及有关问题讨论.地质通报,35(5):633—641.
- 杨志明,侯增谦,宋玉财,等,2008.西藏驱龙超大型斑岩铜矿床:地质、蚀变与成矿.矿床地质,27(3):279—318.
- 杨志明,侯增谦,杨竹森,等,2012.短波红外光谱技术在浅剥蚀斑岩铜矿区勘查中的应用:以西藏念村矿区为例.矿床地质,31(4):699—717.
- 叶天竺,吕志成,庞振山,等,2014.勘查区找矿预测理论与方法(总论).北京:地质出版社.
- 袁晏明,赵温霞,章泽军,等,2008.周口店野外地质实践教学体系与内容.中国地质教育,17(2):61—66.
- 张长青,芮宗瑶,陈毓川,等,2013.中国铅锌矿资源潜力和主要战略接续区.中国地质,40(1):248—272.
- 周家喜,罗开,孙国涛,2021.贵州晴隆丁头山铅锌矿床发现硒超常富集.中国地质,48(1):339—340.
- 周涛发,范裕,王世伟,等,2017.长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式.岩石学报,33(11):3353—3372.