

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.06.001

# 成矿地质体找矿预测理论与方法

严光生<sup>1</sup>, 叶天竺<sup>1,2,\*</sup>, 庞振山<sup>2,3</sup>, 薛建玲<sup>2,3</sup>, 程志中<sup>2,3</sup>, 吕志成<sup>2,3</sup>, 韦昌山<sup>4</sup>, 王玉往<sup>5</sup>, 祝新友<sup>6</sup>, 陈辉<sup>2,3</sup>, 张晓飞<sup>2,3</sup>, 隗含涛<sup>2,3</sup>

YAN Guangsheng<sup>1</sup>, YE Tianzhu<sup>1,2,\*</sup>, PANG Zhenshan<sup>2,3</sup>, XUE Jianling<sup>2,3</sup>, CHENG Zhizhong<sup>2,3</sup>, LYU Zhicheng<sup>2,3</sup>, WEI Changshan<sup>4</sup>, WANG Yuwang<sup>5</sup>, ZHU Xinyou<sup>6</sup>, CHEN Hui<sup>2,3</sup>, ZHANG Xiaofei<sup>2,3</sup>, WEI Hantao<sup>2,3</sup>

1. 中国地质调查局, 北京 100037;

2. 自然资源部矿产勘查技术指导中心, 北京 100037;

3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

4. 中国地质调查局地质力学研究所, 北京 100190;

5. 北京矿产地质研究院, 北京 100012;

6. 中色紫金地质勘查(北京)有限责任公司, 北京 100012

1. China Geological Survey, Beijing 100037, China;

2. Technical Guidance Center for Mineral Resources Exploration, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100037, China;

3. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100190, China;

5. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China;

6. Zhongse Zijin Geological Exploration(Beijing) Co., Ltd., Beijing 100012, China

**摘要:**在大量典型矿床剖析的基础上,以矿物学、岩石学、矿床学、构造地质学、地球化学等基础理论为指导,以大量实地观察和实验数据为支撑,通过总结矿山深部和外围找矿实践和典型矿床研究成果,按照成矿作用内因和外因相结合的辩证思维,成矿作用时间、空间、物质能量相统一的综合思维,以及元素地球化学分类和找矿预测矿床分类的比较思维,提出成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征标志等概念。成矿地质体是形成矿床主要矿产、决定主成矿阶段空间位置的成矿地质作用的实物载体,划分为沉积作用、火山作用、岩浆作用、变质作用和大型变形作用形成的5类成矿地质体。成矿结构面是赋存矿体的各类界面,包括构造界面、岩性界面、物理化学转换界面;成矿作用特征标志是能够直接指示矿体赋存位置和对找矿预测具有特殊意义的标志。依据成矿地质作用对中国主要矿床类型进行梳理划分,归纳总结了主要矿床类型的地质特征,构建了反映矿体赋存位置的成矿地质体-成矿结构面-成矿作用特征标志“三位一体”找矿预测地质模型。在此基础上,提出勘查区找矿预测的工作方法,对矿床学研究、找矿预测、矿产勘查工作具有重要的指导意义。

**关键词:**成矿地质体;成矿结构面;成矿作用特征标志;找矿预测;三位一体;矿产勘查工程

**中图分类号:**P624 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)06-0857-26

Yan G S, Ye T Z, Pang Z S, Xue J L, Cheng Z Z, Lyu Z C, Wei C S, Wang Y W, Zhu X Y, Chen H, Zhang X F, Wei H T.  
Introduction of the theory and method of prospecting prediction of metallogenic geological body. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(6): 857-882

收稿日期:2022-11-03;修订日期:2023-05-18

资助项目:全国危机矿山接替资源找矿专项、国土资源公益性行业科研专项(编号:201411024)和中国地质调查局项目(编号:DD20160052、DD20190570、DD20230053、DD20230355、DD20230356)

作者简介:严光生(1963-),男,博士,研究员,从事矿产资源评价、找矿预测理论和空间地球化学研究。E-mail:yguangsheng@mail.cgs.gov.cn

\*通信作者:叶天竺(1941-),男,正高级工程师,从事矿产勘查及找矿预测研究。E-mail:ytz999@126.com

**Abstract:** Based on the essential theories of geochemistry, mineralogy, structural geology, and economic geology, supported by the practices and research achievements of 230 mineral explorations at the deep and adjacent areas of mining districts and 129 typical mineral deposits, with the thought of combining the endopathic causes (elementary geochemistry characteristics) and exopathic causes (different types of geologic process) of mineralization, this paper proposes new concepts innovatively, called metallogenic geological body, metallogenic structural plane, metallogenic characteristics, and so on. Metallogenic geological body is the carrier of ore-forming geological processes that form the main minerals (with industrial value) and determine the spatial location of the main ore-forming stage. It is divided into five types of metallogenic geological bodies formed by sedimentation, volcanism, magmatism, metamorphism, and large-scale deformation. Metallogenic structural plane is the spatial location of ore-body occurrence, including structural interface, lithology interface, and physicochemical transition interface. Metallogenic characteristics can directly indicate the location of ore bodies and have special significance for prospecting and prediction. According to the new proposed metallogenic geologic process, main deposit types in China are redistricted. The geologic features of these deposit types are summarized. Geological models for prospecting and prediction of metallogenic geological body, metallogenic structural plane, and metallogenic characteristics (also known as the "Trinity" prospecting and prediction geological model) are constructed, reflecting the ore-body occurrence location of these different deposit types. Moreover, working procedures of prospecting and prediction of metallogenic geological body are put forward. The prospecting and prediction theory and method of metallogenic geological body is important guiding significance for mineral deposit research, prospecting prediction, and mineral exploration.

**Key words:** metallogenic geological body; metallogenic structural plane; metallogenic characteristics; prospecting prediction model; trinity; mineral exploration engineering

矿产预测学是应用成矿地质理论,通过成矿规律研究,分析成矿要素,结合地球物理、地球化学等探测信息,总结成矿预测要素,经过类比和定量预测,判断成矿远景地段,指导矿产勘查工作,发现工业矿床的一门理论与方法(胡惠民,1992;朱裕生等,1997;叶天竺等,2014)。20世纪80年代以来,矿产预测学作为一门独立学科从找矿勘查学中逐渐划分出来(赵鹏大,1984;孙文珂,1988)。到21世纪初,随着中国经济建设发展对矿产资源的需求增长,出现了第二轮全国性找矿高潮。随着找矿实践活动的深入,矿产预测学的理论和方法逐渐成熟,并走向综合化和体系化(肖克炎等,2000;赵鹏大等,2003;范永香等,2003;朱裕生,2006;叶天竺等,2007a;成秋明等,2009;丁建华等,2009;王世称,2010;陈建平等,2011;肖克炎等,2013)。根据预测工作区范围和比例尺,可将矿产预测分为区域矿产预测( $\leq 1:5$ 万比例尺)和勘查区矿产预测( $\geq 1:5$ 万比例尺,亦称为大比例尺矿产预测)2种。

大比例尺矿产预测的概念是20世纪80年代在中国开展成矿区划工作时提出的(吴承烈,1988)。1992年,原地质矿产部成矿区划研究室朱裕生等在制订全国第二轮成矿区划技术要求时,把 $\geq 1:5$ 万比例尺的矿产预测划为大比例尺预测(胡惠民,1995)。当时,对大比例尺预测的目的任务、资料基础、方法程序、成果等要求较笼统,并没有确切的说

法,一般和区域矿产预测一并讨论。常见的大比例尺预测方法可分为2类:一类是以科研院所为主的专题研究工作,采用典型矿床研究的方法手段,通过专题研究,总结成矿地质条件和成矿作用特征,进行矿床成因分析和矿床类型划分,提出类比预测意见。这类方法虽然获得了一批有价值的成果,但难以直接推断矿体的赋存位置。另一类是勘查人员主要凭实践经验,依据一般矿床类型成矿特征分析,利用野外获取的矿床地质、矿化蚀变等现象提出找矿思路,边预测边验证,属于“一事一例”的经验式阶段,理论方法缺乏系统性和综合性。

叶天竺等(2007b;2014;2017)在开展230个全国危机矿山接替资源找矿项目,129个典型矿床研究的基础上,结合国内外近年来的重大找矿发现,边实践,边探索,总结了一套勘查区找矿预测方法,将大比例尺矿产预测方法技术系统化、综合化,称为成矿地质体找矿预测理论与方法。

该理论方法为中国勘查区找矿提供了系统的方法体系,显著提升了中国大比例尺矿产预测理论与方法水平,使矿床学、矿床地球化学研究与矿产勘查紧密结合,研究成果直接服务于找矿工作,解决了产学研严重脱节的问题,为中国众多危机矿山和老矿山找矿工作提供了理论方法,并取得了显著成效(薛建玲等,2020;于晓飞等,2020;陈辉等,2021;吕志成等,2022;庞振山等,2023)。本文重点

阐述该理论方法体系的概念、研究思路、基础理论、矿床类型划分、核心内容、找矿预测地质模型、主要矿床类型找矿预测地质模型、工作方法等,研究成果不仅为矿山找矿供了强有力的科技支撑,而且对促进中东部深部找矿提供了理论基础,在指导找矿工作中取得显著成效。

## 1 研究思路与基础理论

### 1.1 基本概念

成矿地质体找矿预测理论与方法是以岩石学、矿物学、矿床学、构造地质学、地球化学等理论为指导,以大比例尺岩性构造蚀变专项地质填图为基础,研究成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征标志,构建成矿地质体找矿预测地质模型,结合应用物探和化探综合方法,推断矿体赋存位置,通过工程验证,发现并初步查明和评价工业矿体的专门性工作。该理论以勘查区大比例尺找矿预测为出发点,是矿产勘查工作的重要组成部分,又称为勘查区找矿预测理论与方法。

### 1.2 研究思路

采用内因与外因相结合的辩证思维,时间、空间、物质、能量相结合的综合思维,元素地球化学分类和找矿预测矿床分类的比较思维,以元素地球化学特征和成矿地质作用的关系为切入点,以成矿物质迁移、沉淀、集聚为研究对象,研究成矿过程中的普遍规律作为找矿预测标志,揭示成矿作用机制,以成矿地质作用划分矿床类型,按矿床类型构建找矿预测地质模型,提出勘查区找矿的地质方法解决方案,破解信息不对称前提下二维转三维的找矿预测难题,最大限度地降低找矿标志的不确定性。

应用矿床地球化学理论,研究成矿物质从流体状态转变为固体矿物的短暂过程。成矿作用过程复杂,成矿类型纷繁多样,巨量成矿物质集聚堆积受各种复杂的因素影响,现阶段科技水平和实验室水平尚不具备全面进行理论总结的条件。元素地球化学特征是理解矿床成因和开展矿产预测的基础和纽带。勘查区找矿预测的任务是应用矿床地球化学理论解释复杂的成矿地质现象,通过研究成矿物质到达容矿空间后由流体转变为固体矿物的物理化学条件变化,从元素地球化学特征的角度再现这一过程,进而解决找矿标志的不确定性问题。

解释复杂纷繁的地质现象,研究确定性找矿标志。决定成矿作用的内因是元素地球化学特征,外因是地质作用条件。通过两方面的研究可以对成矿地质现象进行甄别,区分偶然现象和必然现象,把能够用元素地球化学行为特征理论解释的普遍性现象确定为必然现象,排除无法进行相关理论解释的偶然现象。把成矿作用过程中由元素基本地球化学特征确定的,在各种地质作用条件下都可以出现的普遍现象作为确定性找矿标志。通过地球化学基础理论解释、热力学和矿物学实验资料验证、典型矿床地质事实证实、部分找矿预测实践验证等途径加以确认和归纳,显著提高找矿预测可信度和成功率。

### 1.3 基础理论

成矿作用是构建找矿预测地质模型的理论基础,其基本问题十分复杂又涉及面广。目前人类难以完全理解成矿作用的基本机制,但是通过大量矿床的实际资料研究、实验矿物学数据的积累,可以对其基本机制归纳如下。

#### 1.3.1 成矿作用是地质作用的产物

沉积、火山喷发、岩浆侵入、区域变质、大型变形构造等地质作用是形成特定类型矿床的前提和必要条件。成矿作用的产物为矿体,地质作用的实物载体为地质体,与成矿作用有关的地质作用为成矿地质作用,其实物载体为成矿地质体。矿体与成矿地质体在动力学、时间、空间、物质成分等方面有密切的关系。

(1)成矿作用的产物是矿体,形成主矿体空间定位的成矿地质作用实物载体是成矿地质体。成矿地质体为成矿物质集聚提供了能量。从找矿预测角度而言,无论流体(含挥发组分)、成矿元素等物质来源如何,都必须在成矿地质体中聚集,因此成矿地质体的研究构成了成矿作用研究的基础。

(2)成矿作用主要发生在地质作用中晚期。沉积型矿产是“共生”成矿,成矿物质通常在沉积分异较充分的条件下聚集,在某一类型岩石形成末期的不同岩性界面上形成含矿层位;与火山喷发和岩浆侵入有关的成矿作用,正岩浆成矿作用是在岩浆侵位过程中或侵位后,发生熔离作用、结晶分异作用成矿,岩浆热液成矿作用发生在火山熔体喷发或岩体侵位以后,大规模成矿流体活动引起成矿物质集聚、沉淀成矿;区域变质成矿作用(包括变质和变成

成矿作用)一般发生在变质作用中岩石经过重结晶以后,与变质流体相关,其中部分变质矿产也可以在变质作用的同时发生重结晶作用而叠加富集;大型变形构造成矿作用发生在韧性变形后期和脆性变形转换阶段,成矿物质主要在脆性阶段就位。

(3)成矿作用在地质作用影响范围内发生。空间上,成矿作用必然发生在成矿地质体热动力或沉积水动力影响范围内,因此采用概率统计方法可以确定成矿地质体和矿体的空间关系。

成矿作用和地质作用密切相关,但两者的强度、规模、形成机制、表现形式具有较大差异,它们互为因果,但在研究内容和方法方面又存在较大差别。

### 1.3.2 界面成矿

成矿作用发生在各种地质界面上,主要包括3类:岩性界面、构造界面和物理化学界面。

(1)岩性界面指各种岩石类型的接触面或转换面,在成矿作用过程中非常重要。岩性界面包括:①不同地质作用形成的不同岩石类型的界面,例如沉积岩、变质岩和侵入岩等岩石界面;②不同物理性质的岩石界面,例如沉积岩中的硅质岩和砂板岩;③不同化学性质的岩石界面,例如碳酸盐岩和砂板岩、硅质岩等(贾德龙等,2015)。

(2)构造界面指各种构造作用形成的界面,包括:①原生构造界面,例如沉积岩中的层理面、生物礁、不整合、平行不整合界面,侵入岩体接触面和火山喷发间断面等(陈毓川等,2002);②后生构造界面,例如:断裂、褶皱、节理、裂隙等(舒斌,2005)。

(3)物理化学界面指温度、压力、氧化还原电位和酸碱度变换界面。物理化学界面一般常附生于岩性界面和构造界面上,也可独立存在,例如砂岩型铜矿、铀矿,矿体主要形成于同一岩性层的氧化还原转换带或转换面。斑岩型铜矿矿体经常形成于酸碱转换面(带)。

界面的存在,造成体系内温度、压力、氧化还原条件、酸碱度的变化,破坏了体系的物理化学平衡,成矿组分从流体中沉淀形成矿物,直接控制了矿体位置。

3类界面存在一定关系:①岩性界面和构造界面一定是成矿作用物理化学转换面(带)。例如构造界面一定是成矿作用的降温减压界面,砂岩型铜矿、铀矿一般形成于紫色砂岩和绿色或灰黑色砂岩变换地段,是典型的氧化还原条件转换面(带)。斑

岩型铜、钼矿床中岩体内外接触面就是流体酸碱度转换面(带)或氧化还原转换面(带)。②地质体界面一定是岩性界面,也是原生构造面。例如:侵入体接触带、火山机构各种岩类接触带等。③三类界面在空间上复合存在时对成矿作用最有利。

### 1.3.3 物理化学条件突变成矿

成矿作用指成矿物质形成、迁移、集聚、沉淀的作用过程。成矿物质到达容矿空间后由于物理化学条件(包括温度、压力、酸碱度、氧化还原电位和溶质浓度等)发生突然变化,由流体态变成以矿物为主体的固态。其核心内容有3点:一是成矿物质集聚以后经历了流体态和固态2个阶段;二是由于物理化学条件变化而由流体态转换为固态;三是以地质作用的时间变化尺度而言,这种转换属于突变过程。

## 2 找矿预测矿床类型

矿床类型划分是找矿预测的基础,直接关系到找矿预测地质模型的构建。在进行找矿预测时,需要建立一个科学显示某种矿床类型特征标志信息的预测平台。平台要求减少大量不必要的冗余信息,而最大限度地突出特征标志信息。只有按地质作用分类编制相关专题图件才能达到这一目的。

传统的矿产预测一般采用地质构造矿产图作为底图,加上物探、化探等信息作为预测底图,难以全部提取某一类型矿床的特征性预测要素。如预测沉积类型矿床采用基础地质图作为底图,很难提取沉积岩相构造古地理等要素。因此,按照预测工作方法的要求,以成矿地质作用为分类基础。例如沉积型矿床预测底图采用岩相古地理图和沉积建造构造图,火山岩型矿床预测底图采用火山岩性岩相构造图,岩浆型及岩浆期后热液型矿床采用侵入岩构造图及综合地质建造构造图,变质型矿床采用变质建造构造图作为底图。矿床类型划分应考虑基本地质作用类型,如喷流型矿床,包括海相火山喷流沉积型和碎屑岩喷流沉积型2类,按成矿地质作用为划分原则,两者不能列在同一类型。前者应列入海相火山岩型,后者应列入沉积型大类。成矿地质体也存在差别,前者为火山喷发机构及次火山岩体,后者为特殊沉积建造及同生断裂。

### 2.1 找矿预测矿床类型划分

划分矿床类型的目的是通过研究成矿作用,准确厘定成矿地质体,构建地质模型,进行找矿预测

(王玉往等,2009)。因此,矿床类型划分方案属于成因类型范畴。首先以沉积、火山、侵入、变质、大型变形、复合 6 类地质作用为基础,对矿床进行分

类。在此基础上,再考虑依据大地构造环境、地球化学特征显著不同的矿种组合、特殊矿化特征等因素划分亚类(表 1;叶天竺等,2014)。

表 1 找矿预测矿床类型分类  
Table 1 Classification of main deposit types

成矿地质作用	成矿地质作用亚类	矿床类型	
沉积地质作用	1.表生作用	D01-风化型	
		D02-沉积型(砂矿)	
	2.沉积成岩作用	D03-古(砂)砾岩型(金、铀矿)	
		D04-蒸发沉积型(石膏矿、岩盐矿)	
		D05-化学沉积型(磷、铁、锰、铝矿)	
		D06-黑色页岩型(镍、钼、钒、铀、钴矿)	
	3.热水沉积作用	D07-碎屑岩喷流沉积型(铅锌、铜、铁、锰矿)	
	4.非岩浆热液作用	D08-砂岩型(铜、铀矿)	
		D09-碳酸盐岩容矿的非岩浆后生热液型(铅锌矿)	
D10-海相火山喷流沉积型(铜、铅锌矿)			
火山地质作用	5.海相火山作用	D11-海相火山岩型(铁、锰矿)	
		D12-陆相次火山岩型(铁矿)	
	6.陆相火山作用	D13-陆相次火山热液型(金、银、铅锌、铜、铀矿)	
		D14-超基性岩型(铬铁矿)	
侵入岩浆地质作用	7.正岩浆作用	D15-基性—超基性岩型(铜镍矿)	
		D16-基性岩型(钒钛磁铁矿)	
		D17-花岗岩型(稀有、稀土矿)	
		D18-伟晶岩型(稀有、稀土、铀矿)	
	8.富挥发分岩浆作用	D19-砂卡岩型(铁、铜、钼、金、铅锌、钨、锡矿)	
		D20-高(中)温热液型(钨、锡、稀有、稀土矿)	
		9.岩浆热液作用	D21-斑岩型(铜、钼、金、钨、锡矿)
			D22-中低温热液型(金、银、铅锌、钼矿)
			D23-远成低温热液型(金、锑、汞、钨矿)
区域变质地质作用	10.区域变质作用	D24-受变质型(铁、磷、硼矿)	
		D25-变成型(铀、硼、石墨矿)	
大型变形地质作用	11.韧性剪切带作用	D26-韧性剪切带型(金矿)	
	12.变质核杂岩作用	D27-变质核杂岩型(铜、金矿)	
叠加/复合地质作用	13.复合成矿作用	D28-复合型矿床	
	14.叠加地质作用	D29-叠加型矿床	
	15.其他流体成矿作用	D30-非岩浆热液型矿床	

## 2.2 矿床类型划分问题讨论

(1)关于沉积型矿床类型划分问题:①矿体受层位控制,地层中成矿元素受后期岩浆侵入作用而形成工业矿床,有人称为“改造型”矿床。针对成矿地质体概念,归为后生岩浆热液型。②矿体受层位控制,沉积期成矿元素在地层中富集形成矿化,但不够工业品位,后期经盆地卤水萃取、沿深大断层运移至有利层位,进一步富集后形成工业矿床,称之为非岩浆后生热液型矿床。③原始地层中含有较高丰度的成矿物质,后期通过地下水交代迁移富集成矿,如砂岩铜矿、铀矿(后生沉积型)。④成矿元素在沉积地质作用同时,通过热水喷流沉积成矿(热水沉积型)。⑤成矿元素在沉积成岩作用时形成同生化学沉积成矿(沉积成岩作用)。

(2)关于造山型金矿,目前对造山型金矿理解和判别依据存在多解性,基于成矿地质体的判别:①不采用造山型金矿概念,恢复韧性剪切带型金矿类型。②严格限定于造山期韧性剪切带构造作用形成迁移富集的成矿作用。③造山带或区域变质岩区与韧性剪切带有关,但由岩浆热液活动集聚成矿的一并归为岩浆热液型金矿。

(3)关于浅成低温热液型矿床,国外把次火山热液型金银矿命名为浅成低温热液型矿床(Bonham,1986),又分为高硫化型、中硫化型、低硫化型。中国陆相火山岩型矿床复杂,包括玢岩铁矿和次火山热液型铅锌铜矿、金矿、银矿(李顺庭等,2014),浅成低温热液型矿床不能涵盖。因此,以次火山热液型矿床为大类,进一步以铁、铅锌、铜、金、铀等矿种细分。

(4)关于MVT型铅锌矿(密西西比型铅锌矿),Paradis et al.(2007)指出其为以碳酸盐岩为容矿岩石的铅锌矿床,形成环境特殊。中国有以碳酸盐岩为容矿岩石的铅锌矿床,还有以砂砾岩或钙质砂砾岩为容矿围岩的铅锌矿床,如云南金顶铅锌矿(王安建等,2009)。这些矿床为非岩浆有关热液成矿,与后生卤水作用有关,与美国密西西比型铅锌矿形成条件并不完全相同(Kyle et al.,2002)。因此,命名为非岩浆后生热液型矿床(铅、锌)。

## 3 成矿地质体

找矿预测属于空间预测的范畴,基本原理是确定与预测目的物存在确定性关系的参照物的空间

位置。在找矿预测中,与矿床(体)存在确定性关系的参照物是成矿地质体,成矿地质体是找矿预测各类要素(包括地质、矿产、物探、化探)的核心载体,是构建找矿预测地质模型的基础,对找矿预测具有定向作用。

### 3.1 成矿地质体概念

成矿地质体指与矿床形成在时间、空间和成因上有密切联系的地质体。成矿地质体是形成矿床主要矿产(具有工业价值)、决定主成矿阶段空间位置的成矿地质作用的载体。矿床的形成与成矿地质体的形成时间同时或相近,空间分布与成矿地质体相依。

### 3.2 成矿地质体类型

地质作用指由地球各种动力引起的地壳各层圈相互作用而导致的物质组成、内部结构和构造、外部形态等不断变化和发展的作用(叶天竺等,2007b)。依据动力学机制、形成过程及其产物将地质作用分为沉积地质作用、火山喷发地质作用、岩浆侵入地质作用、区域变质地质作用、大型变形地质作用和复合地质作用6类。各类成矿地质作用对应的成矿地质体如下。

(1)沉积地质作用:地质体为沉积盆地及沉积地层建造,成矿地质体为含矿地层岩石组合-建造,主要位于盆地边缘或次级构造发育地段。盆地一般早期为断陷,后期为拗陷。因此,成矿作用主要集中于盆地边缘及隐蔽断裂复合部位,时间上以与盆地形成同期为主。

(2)火山喷发地质作用:地质体为火山岩组合及火山构造,成矿作用主要集中于火山机构、喷发中心。火山喷流沉积型矿床位于火山机构相邻盆地边部,火山热液矿床位于火山机构次火山岩体顶部,时间上以火山喷发期后为主。

(3)侵入岩浆地质作用:地质体为侵入岩体,分为2类。一类为岩浆矿床,成矿作用由岩浆不混熔造成,矿体由分凝、熔离或副矿物结晶作用形成。第二类为岩浆热液类矿床,成矿作用主要集中于岩浆房高位突出的小岩体顶部及其内外接触带范围内,时间上多为同一期岩浆活动的偏晚阶段侵入体。

(4)区域变质地质作用:地质体为变质建造和变形构造。成矿作用主要集中于褶皱转折端、轴部,某些特殊原岩建造。可分为变质矿床和变成矿床。

(5)大型变形构造:韧性剪切带、变质核杂岩成矿作用主要发生在韧性剪切带叠加脆性构造部位、变质核杂岩中心部位,时间上多为变形构造晚期。

(6)复合地质作用:典型的有区域变质和韧性剪切带、火山喷发作用和岩浆侵入作用、沉积作用和区域变质作用的复合等。

地质作用的研究内容包括建造和构造。地质学家通常把建造理解为地质作用形成的物质组成,把构造理解为不同尺度地质体的结构特征,或者是物质组成形成过程及形成后叠加的构造。在成矿地质体的研究内容中,建造指不同尺度的岩石组合,构造是岩石组合形成过程及环境的体现,即成岩构造,也称“原生”构造及岩石组合形成后的改造。其中与成矿作用相关的,列入成矿构造的研究内容。

### 3.3 确定成矿地质体

确定成矿地质体,首先要准确划分矿床类型,确定成矿地质作用类型和成矿地质体类型;其次根据矿床(体)与成矿地质体之间的形成年龄、空间距离、物质成分对比研究等确定成矿地质体。

成矿地质体确定,一般情况下可通过野外专题填图大致解决,并直接指导找矿勘查工作,但是最终确认还需结合专题样品的采集工作。

### 3.4 确定成矿地质体空间位置

成矿地质体空间位置的确定要求针对已经确定的地质体在空间上查明其分布范围、三维形态、产状等具体空间要素。

出露地表及被探矿工程揭露的成矿地质体的确定,主要通过地质填图、探矿工程和三维立体编图确定。由于成矿作用主要发生在岩性界面、构造界面、物理化学界面中,并形成成矿作用的特征标志。一般以时代地层单位或岩石地层单位为主要内容的大比例尺普通地质图,不能满足找矿预测的需要。因此,需要有反映成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征标志等基本内容的各类专题图件,包括各类专题岩性构造图、蚀变分带、成矿构造等专题图件的实测和编制。

隐伏成矿地质体空间位置的确定主要依靠浅部地质识别标志、物探、化探等资料,其中物探资料占主导地位。

### 3.5 成矿地质体特征研究

沉积类成矿地质体研究内容主要包括沉积岩

建造/沉积作用、构造岩相古地理、第四纪河湖、第四纪沉积类型与地貌等;火山岩类成矿地质体研究内容主要包括火山岩建造/火山作用、火山岩相构造/火山构造等;侵入岩类成矿地质体研究内容主要包括岩浆岩建造/岩浆作用、侵入岩体构造等研究;区域变质类成矿地质体研究内容主要包括变质岩建造/变质作用、变质变形构造等;大型变形构造成矿地质体研究内容主要包括变形构造类型、规模、产状、组合形式,形成时代、变形期次,物质组成、矿化特征,力学性质、运动方式,以及大地构造环境等。

### 3.6 成矿地质体与矿床(体)关系研究

#### 3.6.1 成矿地质体和矿床的时间关系

根据成岩成矿地质作用及其时间关系,成矿地质体和矿床形成的时间关系存在以下特征。

(1)同生成矿作用。成岩和成矿在同一地质作用下同时发生。同生沉积型矿床,矿体以某种特殊岩层和上下围岩同时形成,整合产出,如沉积型铁矿、锰矿、铝土矿、磷矿等;岩浆型矿床,矿体和岩浆岩在分凝或熔离作用下同时形成,如基性—超基性岩型铬铁矿、熔离型铜镍矿、基性岩型钒钛磁铁矿、花岗岩副矿物型稀有和稀散金属矿床等;陆相火山喷发型矿床在火山岩型矿床中存在以岩浆喷溢形成的铁矿,如智利拉科铁矿、中国江苏梅山铁矿;热水喷流沉积型矿床,指沉积岩(以碎屑岩类为主)成岩后,成矿流体沿断裂构造喷流形成矿床,矿体沿顶底板围岩顺层产出,伴生热液交代蚀变矿物,如碎屑岩喷流沉积型矿床(SEDEX型);海相火山喷流沉积型矿床,指在火山喷发期后,沿火山通道由火山热液喷流沉积形成矿床(如VMS型)。

(2)同一地质作用下形成的后生成矿作用。成岩和成矿在同一地质作用下无间断地同时或先后发生。岩浆热液型矿床是在侵入体成岩后成矿流体通过各种沉淀作用形成的矿床。矿体受侵入体接触带构造控制,伴生热液交代蚀变矿物,如斑岩型、矽卡岩型、热液脉型矿床,也包括陆相次火山热液型矿床。

(3)不同地质作用下形成的后生成矿作用。成岩和成矿在不同地质作用下先后发生。砂岩型铜矿、铀矿早期在盆地内沉积形成了砂砾岩为主的地层建造,在后期地质作用下形成砂岩型铜矿、铀矿。成矿作用经常与盆地边缘断裂活动有关,矿体赋存

于氧化还原转换带。非岩浆后生热液型矿床,早期沉积盆地形成了某些金属元素的矿源层,在后期热卤水和深断裂作用下形成由地层层位和断裂双重控制的矿床(如MVT型)。区域变质型矿床,成岩阶段不存在工业矿床,经区域变质后形成工业矿床,如石墨矿、滑石矿等。

(4)成岩成矿后受区域变质作用叠加改造的矿床。早期已经形成了工业矿体,经过区域变质作用后改变了主要特征的矿床,如沉积变质型铁矿。

### 3.6.2 矿床和成矿地质体的空间关系

矿床(体)与成矿地质体的空间位置及影响因素是找矿预测的主要难点之一。影响矿床与成矿地质体空间距离的主要因素有元素分配系数、络合物稳定性、沉淀机制、成矿作用与成岩作用时间差等。目前,关于成矿地质体与矿体的空间位置问题在国内矿床学研究中尚无较多案例,只能根据统计资料加以说明。各种类型矿床成矿地质体与矿体的空间关系是未来找矿预测的重点研究课题之一。

(1)岩浆型矿床:主要有产于超基性岩中的铬铁矿矿床、基性—超基性岩中的铜镍硫化物矿床、基性岩中的钒钛磁铁矿矿床。成矿物质的驱动力是基性—超基性岩浆熔融状态下物质的结晶分异、重力分异或液态动力分异作用及重力驱动。矿体位于岩体内部分异造成的特殊岩相带、岩体底部或者侧伏端。

(2)斑岩型矿床:常见斑岩型铜、钼、金、锡等矿床。成矿地质体为浅成、超浅成侵入体。矿体位于岩体上部或边部内接触带,有的与接触交代型矿床共存,接触交代型矿床大部分形成于外接触带。成矿元素受热液驱动,沉淀作用机制为降温、减压沸腾等作用,形成爆破角砾岩体及大规模网脉状水压裂隙构造(唐菊兴等,2011)。外接触带见热液脉状矿体,一般形成于浅成岩体顶部外接触带远端500~4000 m范围内。

(3)接触交代型矿床:常见铁、铜、铅锌、钨、锡、钼等矿床。成矿地质体为中浅成岩体,成矿元素受热液流体驱动,沉淀作用为充填交代和结晶作用。铁矿形成于岩体顶部、边部、接触带500 m范围内,铅锌矿形成于外接触带1~3 km范围内,铜矿介于两者之间。具有显著的分带性。铁铜矿还常见于岩体内捕虏体的边部。

(4)高温岩浆热液型矿床:主要为钨、锡、铌钽、

铍、稀有金属、稀散金属等矿床。成矿地质体为高F、B的酸性岩浆形成的中深成侵入体。受热液驱动,成矿元素经常借助区域构造应力或借用岩浆侵位前褶皱形成的微裂隙构造富集,形成矿体。沉淀作用主要为减压沸腾作用,内接触带形成网脉状矿化,外接触带由水压裂隙形成自下而上的“五层楼”式脉状矿体。脉体从顶部接触带向上由粗变细,最终消失,显示热液驱动力随着距离侵入体顶由近到远而由强变弱。据统计,热液型脉状钨矿分布于外接触带1300 m左右,最远不超过1500 m,内接触带为云英岩型细脉浸染状矿体,一般分布于内接触带300 m左右。锡矿成矿地质体与钨矿成矿地质体特征基本一致,岩体的侵位深度常为浅成或超浅成,但成矿作用存在显著区别。高温岩浆热液型矿床的外接触带发育受区域构造叠加控制的脉状矿体,有的发育爆破角砾岩型和斑岩型矿体。

(5)中低温岩浆热液型脉状矿体:主要为金、银、铅锌、铜、铋等脉状矿床。成矿物质受构造或热驱动,沉淀以充填作用为主,交代作用为辅,一般距离侵入体接触带2~3 km,不同成矿元素与成矿地质体的距离远近受元素在热液与熔体中的分配系数和沉淀作用机制控制。如铅、锌在热液中的分配系数随压力减少而增加,因此铅锌矿往往与侵入体接触带较远;金主要分配于热液的气相中,因此常见爆破角砾岩,与脉状矿体共生,常形成远程浅成热液矿床;铜在1 kbar的热液中分配系数最大,形成于侵位深度相当的内接触带。

(6)陆相次火山热液型矿床:中国主要存在铁、金+铜、银+铅锌+钼3种组合。成矿元素主要受热液驱动或区域构造叠加,沉淀作用以减压沸腾为主,矿体主要为次火山岩体顶部接触带的细脉浸染状矿体和顶部喷发间断面形成的似层状及脉状矿体。该类矿床一般距次火山岩体或火山机构2~3 km。次火山热液型铁矿主要受中酸性(碱性)次火山岩体控制。

(7)海相火山喷流沉积型矿床:主要为铜、铅锌等矿床。成矿物质驱动力主要为热对流,沉淀作用为岩浆水与海水冷热混合作用,经常于喷发结束后在次火山岩体或喷流口顶部形成似层状矿体,常见高氧逸度下混合作用形成的硫酸盐透镜体。次火山岩体顶部发育水压裂隙作用形成的细脉浸染型矿体。该类矿床一般距火山机构2 km左右。

(8) 沉积变质型矿床:主要为铁、磷等矿床。成矿地质体为特定层位及褶皱构造,成矿物质驱动力为区域应力,沉淀作用为塑性流变,常聚集于向形构造轴部。

(9) 韧性剪切带型矿床:主要为金矿。常形成于韧性剪切带转变或叠加于脆性构造部位,以充填作用为主,沉淀作用为断层阀或泵吸作用,常形成脉状金矿。

(10) 化学沉积型矿床:指成矿作用在地表附近的低温、低压条件下,由各种沉积作用形成的矿床。围岩是沉积岩或土壤,主要受岩相古地理环境和岩相带控制。其中,风化型沉积矿床与古地貌有关。根据成矿与成岩的关系,可以分为沉积同生矿床(如沉积型铁矿、锰矿、磷矿、铝土矿等)、沉积后生矿床(如砂岩型铀矿、砂岩型铜矿、淋积型铁矿、红土型镍矿、堆积型铝土矿等)。上述矿床成岩成矿同体共生,矿体是成矿地质体的一部分。沉积同生矿床的成矿作用和成岩作用基本相同,沉积后生矿床的成矿作用是在岩石形成基础上,孔隙流体或地下水与岩石中分散的成矿物质,通过渗滤、淋积或者交代作用,在物理化学(pH、Eh)条件变换下聚集成矿。

(11) 热水沉积型矿床:指在地下热水作用下,成矿物质通过热力驱动发生对流而混合形成喷流沉积型矿床,基本上属于沉积同生矿床。成矿地质体与矿体同体共生,其中成矿物质的热驱动力受同生断裂(深源)控制,成矿作用中心和含矿层位受同生断裂控制。

(12) 后生非岩浆热液型矿床:指与碳酸盐岩层相关的热卤水沉积成矿作用,成矿作用三要素包括含成矿元素的碳酸盐岩地层、提供热源的(深源)断裂、提供卤水的沉积盆地。由于卤水一般产于特定地层中,因此成矿地质体应为含矿岩层、(深源)断裂及含卤水盆地。矿体与提供驱动力和热液的断裂构造,以及含矿岩层构成的成矿地质体同体共生。

### 3.6.3 成矿地质体与成矿物质聚集的关系

成矿地质体为成矿作用聚集了物质和能量。成矿物质包括成矿元素、水和其他挥发分元素,其中成矿元素可由成矿地质体直接提供,也可由围岩提供,但是必须通过成矿地质体聚集才能形成矿体,水可来自成矿地质体本身或由其带来,也可来自海水、天水或成矿地质体围岩的建造水,通过成

矿地质体聚集的能量混合成矿。集聚成矿物质的能量主要有热能和动力能。

自然界中成矿作用的热能包括成矿地质体提供的热能和断裂传导的深源地热能,因此把传导深源地热能的成岩同生断裂也列为成矿地质体的组成部分。此类断裂既是成矿地质体,也是成矿构造。

成矿物质的驱动力包括重力、压力、热力、热液流体、构造应力等。前 4 种在成岩时直接形成,构造应力由区域应力形成,是成矿地质体以外的驱动力。

### 3.6.4 矿床与成矿地质体的物质成分关系

成矿地质体是矿床物质成分的来源地或汇集地,与矿床存在密切的关系。开展成矿地质体与矿体的关系研究,不仅要研究岩石和构造,还应研究水、硫、成矿元素、挥发分等来源;收集相关地质构造背景下相同成矿带内可以类比的典型矿床的矿床研究资料,开展必要的样品微观专题研究。例如岩石化学、流体包裹体成分、盐度、微量元素、稀土成分、稳定同位素组成等对于划分矿床类型、判别对比地质体和矿体(矿化体)关系是必要的。

## 4 成矿构造和成矿结构面

成矿构造和成矿结构面研究直接解决矿体空间赋存位置、展布特征、形态、规模、产状等特征,是找矿预测的直接目的。

### 4.1 概念

成岩构造指控制地质体空间位置、形态、规模、产状及其内部结构的构造,分为区域控(成)岩构造(带)、矿区成岩构造和成岩原生构造。

成矿构造指与矿床形成及改造有关的控制其发生原因、物质来源、形成环境、空间分布的构造。根据与矿床空间分布的关系,分为矿体构造、矿床构造、矿田构造。对应区域成矿带为区域成矿构造带。

成矿结构面指成矿作用过程中赋存矿体的显性或隐性存在的岩石物理化学性质不连续面,也是成矿物质聚集沉淀的空间界面。

成矿构造系统指同一种成矿地质作用形成的构造系统,分为沉积、火山(喷发)、岩浆(侵入)、断裂、褶皱、复合六大构造系统。

### 4.2 成矿构造和成矿结构面类型

在成矿构造系统中,包含各种类型的成矿结构面(表 2)。

表 2 成矿构造系统及成矿结构面

Table 2 Metallogenic system and metallogenic structural plane

地质作用	成矿构造系统	分类	控岩构造	成岩原生构造	成矿结构面类型	成矿结构面	矿床类型	结构面空间格架
沉积地质作用	沉积构造系统	陆相	盆地边缘断裂	盆地边缘同生断裂、岩性岩相界面	同生断裂、岩性岩相界面、物理化学变换面	①盆缘同生断裂面;②岩相界面;③特殊岩性层;④氧化还原界面/转换带;⑤酸碱转换界面;⑥古风化面	风化型 砂岩型铜、铀矿	③+⑥ ①+②+③+④+⑤上下、左右结构
			盆地边缘断裂、盆地沉降中心、盆内次级构造、断裂	盆地边缘及盆内次级构造、断裂、岩性岩相界面、不整合面、古风化面	同生断裂、岩性岩相界面、不整合面、古风化面	①盆缘同生断裂面;②次级隆拗变换带;③沉降中心部位;④特殊岩性层;⑤岩相带界面;⑥潟湖沙坝;⑦古水温、古水流、古生物变化带;⑧物理化学变换带;⑨后生深源断裂;⑩不整合面;⑪古风化面	化学沉积型 同生热水沉积型 后生热液沉积型	②+③+④+⑤+⑥+⑦+⑧+⑩+⑨上下、左右结构 ①+④左右结构 ①+④+⑨左右结构
火山地质作用	火山构造系统	陆相	火山岩带基底断裂;火山盆地边缘断裂	火山构造、火山机构、火山岩性岩相带、火山岩构造	火山岩性岩相构造、火山机构、次火山岩构造、同生断裂	①火山通道;②火山岩性岩相界面;③次火山原生裂隙;④次火山喷发同断面;⑤次火山岩体顶部裂隙带;⑥爆破角砾岩体;⑦叠加区域断裂	次火山热液型	⑦+③+①+②+⑥+④+⑤上下、左右结构
			岛弧/陆缘、壳深大断裂、大洋中脊张性断裂	火山喷发同断面、火山岩性岩相带、火山机构、火山构造、火山/火山通道构造	火山岩性岩相构造、火山机构/火山通道、次火山构造、同生断裂	①次火山岩体顶部网脉状裂隙带;②火山岩和沉积岩界面;③喷流管道;④叠加区域断裂	火山喷流沉积型	②+①+③+④上下结构
岩浆侵入地质作用	岩浆侵入构造系统	侵入体	蛇绿岩带岩石圈断裂、陆块区伸展构造、造山带深大断裂	蛇绿岩带构造岩片、岩性岩相带、岩体构造、侵入同生断裂	岩性岩相界面、岩体构造、同生断裂	①岩体底部/侧伏端;②岩体同生边界断裂;③构造岩片;④岩性岩相带	基性、超基性岩浆型 地幔岩铬铁矿	②+①+④上下结构 ③上下结构
			岩浆构造带基底断裂、侵入体边缘断裂、区域褶皱断带、背斜轴部	侵入接触面、捕虏体、侵入体顶部水压力裂隙、爆破角砾岩体、侵入同生断裂	侵入接触带构造;侵入体顶部构造、侵入同生构造	①叠加区域同生断裂;②岩体接触面;③捕虏体;④岩体顶部网脉状裂隙;⑤岩体外接触带褶曲/"硅钙面"	斑岩型 矽卡岩型 中高温热液型 中低温热液型	①+②+④上下结构 ②+③+①+⑤左右结构 ①+②+④上下结构 ①+②上下结构
区域变质地质作用	褶皱构造系统	褶曲及其派生断裂		褶皱构造	褶皱构造	①向形构造轴部;②背斜转折端/轴部	沉积变质型	①左右结构
区域构造地质作用	断裂构造系统	韧性剪切带、脆性断裂		同生断裂	同生断裂	①褶皱同生断裂;②背斜褶曲层间破碎带	砂岩型、中低温热液型	①+②左右、上下结构
				韧性剪切带相关脆性断裂	脆性断裂	①脆性剪切带脆性叠加部位 ②脆性断裂侧伏;③叠加于一切成岩原生构造	韧性剪切带型 中低温热液型	①上下结构 ①+②上下结构

成矿构造一般为成矿作用同时性活动的构造,包括成矿前已经存在、成矿作用发生时活动的构造和成矿作用发生同时形成的构造。成矿后构造指矿体形成以后发生活动的构造,改变了矿体的空间位置和赋存状态。

成矿结构面根据成因分为原生成矿结构面、次生成矿结构面。由区域构造为动力形成的成矿结构面为次生成矿结构面,主要有断裂、褶皱、节理、裂隙等构造界面。由重力、压力、热力、流体为动力形成的成矿结构面,以及由物理化学转换界面组成的原生成矿结构面,主要包括特殊岩性层界面、沉积同生断裂、后生化学沉积氧化还原转换界面(带)、热液成矿氧化还原转换界面、细脉浸染状水压裂隙、脉状水压裂隙、爆破角砾岩、侵入体接触界面、硅钙岩性界面、单向固结结构面、海底火山喷发沉积结构面、陆相破火山口层状沉凝灰岩结构面、岩浆型铜镍硫化物矿床熔离岩相结构面、超基性岩铬铁矿及基性岩钒钛磁铁矿结晶分异结构面 14 类。原生成矿结构面一般控制了规模巨大的深部盲矿体,空间上多位于断裂裂隙构造控制的脉状矿体的深部,对于深部找矿具有重要意义。

#### 4.3 成矿构造和成矿结构面研究要点

成矿构造和成矿结构面研究要点主要有 7 个方面:①确定成矿构造系统及成矿结构面分类;②区分成矿前、成矿期、成矿后构造;③成矿结构面特征;④成矿构造和控岩构造关系;⑤构建勘查区成矿结构面空间格架;⑥成矿构造和区域构造关系;⑦建立成矿/矿田构造体系。

#### 4.4 研究成矿构造和结构面的找矿意义

构造界面、岩性界面、物理化学界面 3 类成矿结构面在同一矿床类型中经常形成密切的时空关系。

构造界面和岩性界面在空间上重叠出现或形成上下关系,在时间上同时形成。构造界面、岩性界面和物理化学界面,经常形成因果关系,由于构造界面、岩性界面经常构成物理化学条件的转换界面,因此常出现三者的复合关系。当 3 类结构面复合出现时,找矿意义重大。如果物理化学界面不明显或不存在,一般矿床规模不会很大;如果在构造界面、岩性界面上叠加规模巨大、显著的物理化学界面,则常形成规模巨大的矿床。

3 类结构面的上下关系对指示深部找矿具有重大意义。一般情况下,同一矿床构造界面在浅部或

边部,经常形成陡倾斜脉状矿体,但规模较小。岩性界面在深部及中心部位,经常形成缓倾斜似层状矿体,规模较大。对于物理化学界面,如果浅部出现显示成矿前期氧化环境下的蚀变矿物组合,深部可能存在氧化还原转换界面。这种物理化学界面可能与岩性或地质体界面重叠,对预测变价元素矿产或沉积类矿产有重要意义。如果浅部出现成矿前期水热酸碱蚀变矿物组合,深部可能存在酸碱转换界面,这对岩浆热液类、火山岩类矿产意义重大。

关于岩性界面的找矿意义,过去在研究成矿构造时,一般都对断裂、褶皱等构造比较重视。但是,对于现今规模巨大的矿床,不论其成因类型是什么,一般都认为与岩性界面相关。首先,由于相邻层位岩石物理性质的差别,岩性界面容易在区域构造作用下形成层间破碎带,构成容矿空间和减压带;其次,由于相邻层位岩石化学性质的差别,在流体作用下容易形成成矿地球化学障,引起流体物理化学条件的急剧变化,造成大量成矿物质的沉淀。重要的岩性界面有地层不整合面、平行不整合面、火山岩和沉积岩界面,以及以硅铝质为主的砂板岩、硅质岩类和碳酸盐岩类界面,俗称硅钙面等。

#### 4.5 矿床类型和结构面类型关系

##### (1) 沉积型矿床

岩性界面、沉积作用同生断裂及物理化学转换带等结构面的叠加组合是规模型矿床不可缺失的成矿结构面。

同生沉积矿床:包括热卤水沉积矿床、化学沉积矿床、碎屑沉积矿床、古风化沉积矿床等。盆地边缘叠加同沉积断裂构造、层间岩性界面、沉积间断面、不整合面。常见特殊岩性层包括硅质岩层、膏盐层、生物礁、潟湖堤坝构造、地下水锋面、紫色岩层和绿色岩层转换面,常见炭质、含零星沉积黄铁矿、零星沥青等。具有显著的氧化还原或酸碱转换物理化学界面,为上下岩层转换面或同层位沿倾向转换带。

后生沉积矿床:包括一切非岩浆后生热液成矿作用形成的矿床。在前期原生含矿层位之上叠加了上叠构造盆地或深源断裂,形成成矿物质重溶再沉淀作用。主要与后生断裂构造相关,常形成高品位的矿床。

##### (2) 海相火山喷流沉积型矿床

按火山机构+火山岩/沉积岩性界面+物理化学

界面构建空间格架。矿体赋存于火山机构相关的火山岩和沉积岩转换界面,也是酸碱转换和氧化还原转换界面叠加区域性断裂构造区。存在显著的二元结构面,上部为缓倾斜的似层状结构面,下部为与次火山岩体相关的陡倾斜细脉浸染状结构面,顶部常见酸性氧化环境下形成的硫酸盐类交代矿物,底部常见碱性还原环境下形成的交代矿物组合。

### (3) 火山热液型矿床

按火山机构+次火山岩体顶部接触面+断裂构造+物理化学界面构建空间格架。矿体赋存于火山机构相关的次火山岩体附近,叠加区域性断裂构造。存在显著的二元结构,上部为陡倾斜的脉状矿体、爆破角砾岩筒矿体,深部为缓倾斜的次火山岩体,顶部接触带为似层状矿体,同时发育大规模面状热水酸碱蚀变,也是酸碱、氧化还原转换界面。

### (4) 斑岩型铜钼矿床

按成矿侵入体顶部接触带+物理化学界面+区域构造带构建空间格架。高位浅成侵入体顶部接触面,叠加区域性断裂构造,具有显著的酸碱及氧化还原转换界面。构造界面的强度决定了矿化的富集程度,成矿构造和控岩构造或继承或改变。常见岩体顶部流体形成的水压裂隙带和爆破角砾岩筒,规模型矿床具有次生和原生成矿结构面叠加特征。

### (5) 矽卡岩型矿床

按成矿侵入体接触带+岩性界面+双阶段物理化学界面构建空间格架。矿体赋存于侵入体接触带、爆破角砾岩带、捕虏体接触带、外接触带背形褶曲轴部、层间破碎带、硅钙岩性界面等。常沿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。存在显著的双阶段成矿地球化学过程。如果存在区域同时性构造叠加成矿,容易形成规模巨大的矿床。

### (6) 岩浆型矿床

按岩体底部/倾伏端+岩相带界面+矿岩分凝同时性断裂构建空间格架。矿体赋存于侵入基性超基性岩岩性岩相带、岩体底部或侧伏端,另一类花岗岩型稀有稀散矿床呈稀疏浸染状副矿物存在。如果存在岩浆分凝或熔离同时性断裂活动,往往形成脉状贯入而产出富矿。

### (7) 高温热液型矿床

按区域构造带+侵入体顶部接触带+物理化学

界面构建空间格架。矿体赋存于成矿侵入体内外接触带,外接触带 1.3~1.5 km 是陡倾斜密集裂隙带,内接触带 300~500 m 是缓倾斜似层状矿体。

### (8) 中低温热液型脉状矿床

按区域构造带+侵入体外接触带+侧伏+物理化学界面构建空间格架。矿体赋存于区域构造控制的断裂带中,形成大脉状矿体,矿体离成矿侵入体 2~3 km (视成岩成矿时间间隔和成矿元素而确定)。矿体延深存在垂直运动方向的侧伏规律。

### (9) 区域变质类矿床

按向型褶曲构造轴部或其他区域变质作用前原始矿床类型构建空间格架。沉积变质矿床矿体赋存于向型褶曲轴部、转折端。其他类型为变质火山喷流型、变质矽卡岩型等矿床。在原有地质作用基础上叠加区域变质作用,或叠加韧性剪切作用。常见的以已有矿床经变质改造富集类型为主。此外常见变成类非金属矿产。

### (10) 大型变形构造

按韧性剪切带+脆性构造+侧伏构造+物理化学界面构建空间格架。韧性剪切带的脆性构造发育阶段形成脉状矿床,存在侧伏构造。变质核杂岩构造,形成似环状伸展(张性)构造成矿,常见金矿、铜矿,往往形成规模巨大的矿床。

## 5 成矿作用特征标志

成矿作用特征标志研究是找矿预测的核心内容之一,也是预测未揭露或隐伏矿体的主要依据(叶天竺等,2014)。成矿作用过程复杂,成矿作用的产物纷繁多样。其中能够直接指示矿体赋存位置,对找矿预测具有特殊意义的标志称为成矿作用特征标志。成矿作用相关理论应用于找矿预测的基本思路为:一是应用元素离子电位理论讨论成矿元素迁移和沉淀的一般性规律;二是针对岩浆热液成矿作用,从成矿元素在热液与熔体中的分配出发,并应用络合物理论,研究元素以络合物形式迁移的具体规律;三是应用元素沉淀原理分析成矿物质沉淀的具体作用方式;四是针对已经沉淀的矿物,应用类质同象理论分析元素赋存状态和共生组合;五是应用矿物生成的物理化学条件,确定成矿地球化学障位置,即成矿作用中心位置(图1)。

### 5.1 成矿作用产物特征

成矿作用包括时间、空间范围、物理化学条件

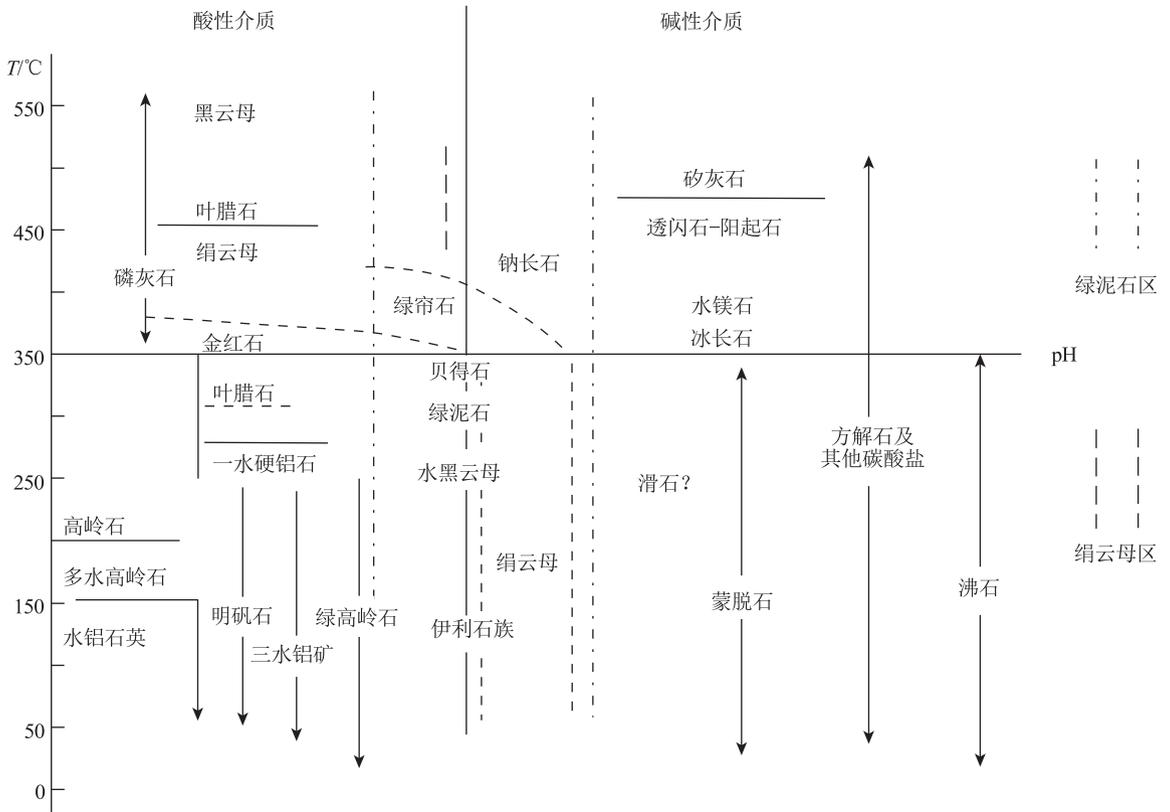


图 1 斯特林格姆热液合成实验 pH-T 矿物分布图(据斯米尔诺夫,1985)

Fig. 1 Distribution of pH-T minerals in stirlingham hydrothermal synthesis experiment

变换等。成矿作用产物特征包括矿体宏观特征、矿物特征、成矿元素特征,三者密不可分,反映了成矿物质的不同层次。对于预测未揭露矿体或全隐伏矿体,矿体以外的成矿作用产物特征更重要。

### 5.2 成矿作用特征

#### 5.2.1 成矿作用过程

成矿元素在流体作用下从地壳物质中由分散状态通过迁移富集形成工业矿体的全过程,称为成矿作用过程。找矿预测主要研究成矿物质已经聚集到“矿床”(包括未揭露矿体的勘查区)所在位置及其周边范围以后的作用过程。

成矿作用过程可划分为成矿前期、成矿期、成矿后期 3 个阶段,这与典型矿床研究中成矿阶段的划分存在差别。主要原因基于找矿预测的实际需要。通过大量典型矿床的研究,成矿作用过程先后在矿物组合、元素组合等方面随着流体温度、压力、酸碱度、氧化还原电位的变化,以成矿主元素沉淀为界,存在前、中、后 3 阶段的显著差别。

成矿前期:成矿主元素已经富集并已迁移到“矿床”位置,但流体处于高温、高压、强酸或强碱、强氧化或还原条件下,此时成矿物质,包括水、挥发分及主元素以外的物质发生先期沉淀,产生大量新生的交代矿物。而成矿主元素尚处于流体状态,矿体尚未就位。

成矿期:随着成矿流体物理化学条件继续变化,降温减压,酸碱、氧化还原互为转化。成矿主元素在流体中大规模卸载,矿体就位。此时矿体两侧同时形成新的交代矿物。

成矿后期:成矿主元素卸载后,成矿流体中剩余成分最后沉淀,形成成矿后期产物。

每一个成矿系统从逻辑上都存在三阶段成矿作用过程。由于不同成矿地质条件,不同成矿类型成矿流体的性质及物理化学变换条件,上述各阶段产物存在显著差异。

查明成矿作用过程的主要手段,是查明矿物的生成顺序。根据矿床地质研究方法,矿物生成顺序

的确定可依赖于矿物颗粒或集合体的关系,通过矿物共伴生组合,相互充填、交代、溶蚀、包裹等现象,确定矿物生成顺序。

目前成矿阶段研究中存在2种情况,一是成矿前期阶段,并未单独划分,鉴于成矿前期阶段形成的产物对未揭露矿体有特殊意义,因此应特别加以鉴别及划分。二是常见把同一种矿物表示为不分阶段,前后长期生长,实际上不符合成矿过程的基本规律。根据找矿预测的需要,在确定成矿作用特征标志时应当分开表示。例如热液型矿床中的石英在成矿前期为高温石英,常见钾硅化、次生石英岩化、云英岩化等蚀变。成矿期阶段为中低温石英,常见硅化绢云母化、黄铁绢英岩化等蚀变。成矿后期为低温石英,常见玉髓化、石英方解石化等蚀变。其中次生石英岩化、钾硅化对指示未揭露矿体存在与否尤其重要。

#### 5.2.2 成矿作用空间范围及其特征

成矿作用过程的影响范围称为成矿作用空间范围,主要体现为矿体、矿物、元素的空间分布。首先以矿体为中心,由矿石矿物和脉石矿物组成,集中分布主成矿元素。向外为近矿围岩蚀变、远矿围岩蚀变。成矿元素分布范围更宽广,除主成矿元素外,其他由于成矿作用形成的伴生元素或微量元素变化,由矿体向外形成近程、远程元素组合分带。研究成矿作用空间范围对找矿预测意义重大,尤其对预测隐伏矿体赋存位置主要通过围岩蚀变矿物组合分带标志和成矿元素组合分带标志加以判别。

成矿作用深度范围指成矿作用在垂直方向上影响的全部范围,包括矿体及相关蚀变的全部空间(叶天竺等,2007b;2014),其范围比矿体垂向延伸大得多。鉴于其对预测深部矿体具有重要意义,在成矿作用范围研究中应强调深度研究(秦克章等,2021)。以经典的斑岩铜矿成矿模式中的蚀变分带为例,矿体以钾硅化、硅化绢云母化为主,上部发育青磐岩化、泥化,下部发育钾化。成矿作用深度范围包括上述3个蚀变带全部范围,并不单指矿体深度范围。目前矿床研究工作中经常把成矿深度以某一深度数据表示,这对于深部矿体预测是不够的,应当尽量以深度范围加以表达。

成矿作用强度中心指矿体赋存位置中成矿主元素含量最富集的部位。一个矿床可以存在一个或数个成矿作用强度中心,因此,往往形成若干个

矿段。群脉型矿床往往由规模最大、品位最富、资源量最多的矿体构成矿作用强度中心。

成矿前期阶段和成矿期阶段的成矿作用产物,两者在时间、顺序上分先后,空间上形成分带、交代叠加、渐变过渡或包容等错综复杂的关系。形成的矿物和元素组合常常不同。成矿前期强度中心常渐变过渡到成矿期的矿体部位,其新生交代矿物的数量及密集程度随着距离矿体的远近由弱变强。因此,成矿前期阶段的成矿作用强度指向可以直接推测未揭露矿体的赋存部位。

成矿作用的强度,首先受成矿元素的丰度、流体挥发组分的含量等内部因素制约。同时受成矿作用强烈程度及由此产生的温度、压力、酸碱度、氧化还原条件变化的速度、反差等制约。此外也受成矿作用过程中的外来物质加入等因素影响,其中最主要的因素是构造活动的强度。因此,构造活动中心经常构成成矿作用的强度中心,成矿结构面中最重要的类型就是成矿构造。

成矿作用一般发生在成矿物理化学条件变换的位置,矿体多形成于地球化学障部位,因此酸碱或氧化还原变换部位就是成矿作用强度中心,可以利用酸碱或氧化还原条件矿物标志预测隐伏矿体位置。

#### 5.3 成矿作用特征标志研究要点

##### (1) 矿体宏观特征研究

矿体宏观特征研究包括:①矿化样式研究;②矿体品位、厚度空间分布特征研究;③矿化样式和成矿地质体、成矿结构面的关系研究。

矿化样式研究:矿化样式指矿体形态、规模、产状、矿石结构构造、矿种组合等矿体宏观特征的专用名词,以此和成矿作用其他特征区别开来。决定不同矿化样式的主要因素是成矿物质的沉淀作用方式,例如陡倾斜石英脉型金矿、陡倾斜破碎蚀变岩型脉状金矿、缓倾斜似层状铅锌矿、接触带缓倾斜似层状浸染型钨矿、陡倾斜细脉-大脉密脉带钨矿等。结合矿化样式研究和成矿地质体空间位置关系,通过类比同一成矿区带中同类型典型矿床特征,推测勘查区深部是否存在其他矿化样式的矿体,即通过浅部已控制的矿体的矿化样式研究,分析判断深部存在其他矿化样式矿体的可能。

矿体品位、厚度空间分布特征研究:研究和分析矿体品位、厚度在空间上的变化规律,一般可以

沿水平或垂直剖面或者沿矿体纵投影剖面编制成矿元素品位及厚度等值线图,通过等值线图推测矿体向下延伸的可能方向,推测深部可能出现的矿体。据统计,受断裂控制的热液脉状矿体绝大多数具有侧伏分布的规律,矿体的侧伏方向与成矿期断裂运动方向垂直、与矿体品位等值线长轴方向垂直、与矿体厚度等值线长轴方向平行。

矿化样式和成矿地质体、成矿结构面的关系研究:通过研究矿化样式和成矿地质体、成矿结构面的关系,构建整个矿床的找矿预测地质模型。根据已控制的矿体,分析矿体和成矿地质体的关系,进一步通过成矿结构面空间结构的分析,判断是否存在深浅或上下或左右或成矿地质体内外二元空间结构模式,分析已知矿体或矿化线索在地质模型整体结构中的空间位置,对比常见矿床类型和成矿区带内典型矿床已知的整体空间结构,进行勘查区具体的找矿预测地质模型结构分析。

## (2) 矿物特征研究

包括矿石矿物和脉石矿物2类。涵盖单矿物种类、含量、矿物标型特征,特征元素、流体包裹体特征,矿石结构构造、相互关系,矿物生成同位素年龄研究。

## (3) 成矿蚀变带研究

矿床蚀变带研究是成矿作用特征标志的重要内容,也是预测深部隐伏矿体的基本手段之一。主要包括:划分成矿早阶段、主阶段、晚阶段蚀变矿物共生组合,查明空间分布及蚀变矿物组合关系。对于隐伏矿体的预测,应特别重视成矿作用早阶段蚀变,如岩浆热液型矿床,在成矿物质通过流体聚集到勘查区所在位置时,由于成矿作用早阶段成矿介质尚处于强酸、高温、高压条件,成矿元素尚未沉淀,此时成矿流体对围岩形成大规模交代作用,出现大量蚀变矿物,其规模和强度远大于矿体分布范围,对找矿具有重要的指示意义。

## (4) 成矿元素特征研究

包括含量、组合、空间分布、赋存状态、物相特征、稀土元素配分、特征微量元素、稳定同位素特征等研究。

## (5) 成矿物理化学条件转换标志和沉淀作用机制研究

主要通过流体包裹体定量测定矿物形成的温度、压力、酸碱度、氧化还原电位等数据。由于单体

包裹体测定条件的限制,常用矿物交代关系定性判别变化关系。

## (6) 物质成分来源研究

物质成分来源是成矿作用特征研究的重要内容,对于确定矿床类型、成矿地质体,成矿元素迁移沉淀等具有重要意义。主要研究内容包括:①矿床背景场研究:在无矿化蚀变的正常岩石中进行成矿元素背景含量测定,确定成矿元素可能来源。②通过对比矿石和地质体同位素组成、微量(含稀土)元素配分等特征确定成矿元素可能来源。③通过硫、氢、氧同位素对比确定水、硫来源。④流体包裹体示踪。

## (7) 成矿时代或年龄的确定

通过矿床成矿年龄的确定,可以准确分析成矿地质背景,厘定矿床类型和成矿地质体。

## (8) 成矿深度研究

通过成矿深度研究可推测勘查区剥蚀深度,因此研究成矿深度非常重要。

## (9) 成矿作用特征和成矿地质体、成矿结构面关系研究

研究成矿作用特征标志和成矿地质体、成矿结构面在时间、空间及物质成分的关系。

# 6 成矿地质体找矿预测地质模型

## 6.1 找矿预测地质模型概念

成矿地质体找矿预测地质模型是在勘查区已有矿产勘查开发资料的基础上,通过成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征标志等专项研究,按照三维二元结构特征建立的表达勘查区已知和预测矿体(床)全部地质特征、为部署探矿工程提供依据的实体模型。具有以下基本特征:一是以勘查区已有勘查开发工作所取得的矿体(床)地质特征资料为基础,推测部分以宏观和微观信息等多元信息为依据。二是以三维空间形态加以形象化表达,同时表达成矿作用时间过程、物质成分等内容,能够反映成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征标志等基本内容及空间二元结构基本特征。三是采用概念化表达的形式,在空间表达上符合已有平面、剖面地质事实,推测部分原则上可以直接布置探矿工程,或者通过新一轮物(化)探工作等辅助手段后,布置探矿工程。四是通过探矿工程不断修改和完善地质模型。由于原有勘查工

作和专项研究工作程度的局限,预测结果可能出现多解,需通过探矿工程验证、新一轮物(化)探多元信息的获取及专项研究所获得的信息,不断修改和完善。五是找矿预测地质模型一般不涉及勘查区矿床(体)直接相关的地球物理和地球化学特征。

“成矿地质体找矿预测地质模型”和“矿床模式”概念存在较大区别。矿床模式是对同一类型矿床的地质、构造、地球物理、地球化学和其他基本特征进行概括,用简洁的文字和图表表达,是反映矿床成矿规律认识的一种表达方式(黄宗理等,2005)。成矿地质体找矿预测地质模型的目的用于勘查区找矿预测,突出并细化表述与找矿预测直接相关的地质矿产特征标志,部分内容通过探矿工程控制并揭露,部分内容通过已有资料的研究进行推测。

## 6.2 找矿预测地质模型结构特征

通过大量大中型典型矿床研究发现,由于成矿作用物理化学条件和成矿能量的本质区别,成矿地质体边界或接触面的内外、上下,分别形成不同的矿化样式、矿物组合、元素组合等成矿作用特征标志。从成矿地质体的角度,矿床的地质模型呈现二元结构特征;从成矿结构面的角度,常呈现多元结构特征。如次火山热液型矿床,成矿地质体为次火山岩体。从成矿地质体而言,分为次火山岩体顶部接触带为界的内外二元结构;从成矿结构面而言,最顶部为脉状矿体,中间为层凝灰岩底部的似层状矿体,底部为次火山岩体顶部接触带的层块状细脉浸染型矿体,构成了多元结构特征。这种以内外、上下、左右、深浅的多元结构模式,概括了上述大型矿床的基本特征。据此通过勘查区找矿预测地质模型多元结构模式的分析,可以识别并预测大型矿床的存在。

找矿预测地质模型二元结构特征主要从矿化样式、成矿作用空间、成矿过程等特征进行解析。

### 6.2.1 矿化样式特征

由脉、层、块体3种矿化样式的矿体,在空间上按照排列组合搭配构成内外、上下、左右、深浅二元结构。内外结构:指成矿地质体边界内外或成矿地质体接触带内外形成的二元结构,常见外脉内层、外层内体、外脉内体、外层内脉等二元模式。上下结构:指成矿地质体顶部的垂向上下二元结构,常见上脉下层、上薄脉下大脉、上细脉下大脉、上脉下层、上层下脉、上脉下体等二元模式,如铜陵矿集区

块状硫化物矿床的上下二元结构(李红阳等,2006)。左右结构:指成矿地质体横向平面关系。构成左(右)脉右(左)体,左(右)脉右(左)层、左(右)层右(左)体等二元模式。常见于成矿地质体边界及成矿地质体接触带两侧。深浅结构:由于矿体形成深度不同而形成的不同矿化样式,构成深浅二元结构。如浅部为细脉密脉,深部为细脉浸染状块体;浅部为似层状矿体,深部为浸染状矿体等。此种结构和上下结构存在相似之处,但是深浅结构受矿体形成的绝对深度控制,上下结构则为矿体的相对位置关系,两者差别显著。

### 6.2.2 成矿作用空间特征

氧化还原转换带特征:变价元素Fe、Mn、Cu、Eu、Ti等弱碱性元素,还原条件迁移,氧化条件沉淀;变价元素U、Mo、V、S、As等酸性元素,氧化条件迁移,还原条件沉淀(刘英俊等,1984;赵伦山等,1988;张德会等,1992;韩吟文等,2003;张德会,2020)。

酸碱转换带特征:构成酸性转碱性或者碱性转酸性的矿物组合二元结构模式。

成矿元素共伴生组合分带特征:成矿地质体相关的高温元素和中低温元素组合分带,远程元素和近程元素、共伴生元素互相转换分带二元结构模式。

特殊岩性层界面特征:碳酸盐岩类和砂板岩类岩性界面、火山岩和沉积岩界面、硅质岩、膏盐层等特殊岩性层界面构成二元结构模式。

成矿地质体界面特征:沉积盆地边部、隐伏侵入体顶部接触面内外等二元结构模式。

断裂和褶皱构造、特殊岩性层界面、地质体界面和物理化学条件转换带叠加特征:3类成矿结构面以排列组合方式叠加构成二元结构模式。如断裂和褶皱、构造和岩性界面、物理化学转换带与断裂构造等二元结构模式。

### 6.2.3 成矿作用时间特征

成矿物质迁移沉淀转换的蚀变矿物组合特征:第一阶段,成矿前期蚀变为高温、高压、强酸强碱、强氧化环境下形成的蚀变矿物组合,其范围广,强度大,一般无矿化或者呈零星矿化。第二阶段,降温、降压、pH值升高或降低、氧逸度升高或降低,大量金属成矿元素结晶沉淀,形成近矿围岩蚀变和金属矿物组合。上述两者构成成矿作用时间过程的二元结构模式。

### 6.3 找矿预测地质模型的基本内容

#### 6.3.1 确定成矿地质体在模型中的空间位置

在模型中,成矿作用围绕成矿地质体发生,矿体(床)围绕成矿地质体定位。因此,成矿地质体在模型中的空间定位决定了整个模型的结构特征。成矿地质体和矿体主要构成内外结构模式。即以成矿地质体边界或接触带为界限的内外二元结构模式,上下、左右、深浅结构模式都是由此而派生的,因此内外结构模式也可以称为二元结构模式。

隐伏成矿地质体为深部矿体及大型矿床提供了预测空间,成矿深度和剥蚀程度研究非常重要。矿区剥蚀程度高,残留的矿体往往规模不大;剥蚀程度低,成矿地质体多为隐伏的,深部保留大矿的可能性大。由于隐伏成矿地质体并未被揭露,具体位置难以准确确定,给构建成矿地质体找矿预测实地(体)地质模型带来难度。需通过浅部成矿作用特征标志研究,同时应用物探、化探等多元信息进行综合推测。

#### 6.3.2 成矿结构面构成模型结构的基本样式

找矿预测地质模型二元结构模式特征,除内外结构外,左右、上下、深浅结构模式主要取决于成矿结构面的具体特征。构造面、岩性和地质体界面接触带、物理化学转换面(带)的形态特征决定了矿化样式,空间分布和配置构成了二元结构模式。矿体在成矿地质体内外结构基础上派生了由成矿结构面决定的左右、上下(指成矿相对深度关系)、深浅(指成矿绝对深度关系)等二元结构模式。因此,建模结构分析中构建成矿结构面空间配置关系十分重要。

#### 6.3.3 成矿作用特征标志是推测深部结构的主要依据

成矿地质体和成矿结构面构成了模型结构的主体,深部是否存在矿体,需要通过成矿作用特征标志研究进行推断。浅部不发育成矿作用特征标志的基本要素,构建的找矿模型不能为找矿预测提供足够的依据。矿化样式、矿物分带、元素分带、蚀变带特征等基本要素确定的成矿物理化学环境转换界面,为推测深部成矿作用中心、找矿靶区确定奠定基础。前述成矿作用特征标志研究要点,可提供找矿预测模型结构分析的依据。成矿时代研究确定成矿地质体,矿体宏观特征、成矿深度、成

矿蚀变带矿物特征研究构成模型结构的骨架,并构建二元结构模式。通过成矿元素成分、成矿的物理化学条件、成矿物质来源大致厘定成矿作用中心,并推测矿体密集部位。

#### 6.4 确认成矿作用中心在模型中的位置

成矿作用中心是矿体和成矿主元素聚集的部位。影响成矿作用的主要因素是物理化学条件的转换,包括成矿过程的温度、压力、酸碱度、氧化还原电位的变化,溶质浓度的改变。成矿作用中心位于物理化学条件转换界面处。在模型构建时,确定物理化学条件转换面发生的具体位置,也是成矿作用特征标志综合指向位置。成矿作用中心是各类成矿地质作用成矿动力学条件下形成的物理化学条件转换带。例如沉积成矿作用,主要发生在盆地边部、同生断裂、盆地原生构造边部、不整合面等;火山热液型矿床主要形成于次火山岩体顶部接触带及其浅部断裂构造、爆破角砾岩(快速减压带),一般发生在火山喷发间歇期;岩浆热液型矿床主要形成于岩浆房顶部小岩体接触带及顶部围岩各类岩性界面、断裂构造带等,一般形成于多期次侵入体末期;海相火山喷流沉积型矿床主要形成于海底火山岩的上部,或喷发间歇期,具体位置为火山岩和沉积岩接触面;区域变质型矿床,主要形成于原岩组合相关的变质变形中心部位;沉积变质类矿床,形成于由重力和塑性流变作用相关的向型构造轴部及其他变形构造强度中心。

总之,成矿作用中心位置一般是矿体密集部位,主要位于成矿地质体、成矿结构面中物理化学条件转化部位及成矿作用特征标志综合指向部位。根据成矿地质体-成矿构造与成矿结构面-成矿作用特征标志“三位一体”的基本理论,建立工作区找矿预测地质模型,推测矿化中心具体位置。

综上所述,地质模型结构分析是建模的重要内容,研究成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征标志等的结构,圈定找矿靶区,为布置验证工程奠定坚实的理论基础。

## 7 主要矿床类型找矿预测地质模型

在深入研究国内外经典矿床模型的基础上(毛景文等,2012;吕志成等,2022),按照成矿地质体、成矿结构面和矿体的关系,结合成矿作用特征标志,简要归纳了常见矿床类型的空间结构地质模型

特征和实例。

### (1) 沉积型矿床

砂岩型铜、铀矿为沉积后生矿床,主岩为沉积岩,主要受岩相古地理环境和岩相控制。矿床成岩成矿同体共生,矿体是成矿地质体的一部分(图2)。

成矿结构面总体为盆地边缘隐蔽断裂氧化还原和酸碱转换带,深部存在不同类型的隐伏成矿结构面控制的矿体。浅部矿体在毗邻盆地边缘或深部往往受隐伏的隐蔽断裂、不整合面、古风化壳、次级盆地边缘带、生物礁、水下高地、潟湖砂坝、隐伏氧化还原和酸碱转换界面控制,构成成矿作用中心,直接控制矿体。

可以分为2种模式:第一种为深浅多元结构,浅部为氧化带,深部为还原带,如砂岩型铜矿、砂岩型铀矿等;第二种为左右多元结构,同一岩性地层,一侧为氧化带,另一侧为还原带。

### (2) 热水喷流沉积型矿床

浅部矿体在其毗邻盆地边缘,深部存在隐伏的顺层同生断裂控制的隐伏矿体。成矿作用中心主要形成于不同岩石建造交界面和同生断裂构造叠加部位。利用黄铁矿和铜、铅锌等分层模式及上下关系,建立垂向分带分层模式。典型实例如内蒙古霍各乞铜矿及东升庙、炭窑口等铅锌矿床。

### (3) 碳酸盐岩容矿的非岩浆后生热液矿床

矿体产于白云岩和灰岩变换带的白云岩层中,矿床受盆地特定层位控制,矿体受沉积后生成矿断裂构造控制。控矿断裂系统和附近膏盐盆地边界断裂系统为同一构造系统。存在成矿物质和卤水双源成矿地质体。后期的膏盐盆地提供卤水,深源构造提供热能,原有的含矿碳酸盐岩层提供金属成矿物质,通过后期的深源构造活动形成后生低温热液矿床,后期深源断裂是成矿作用中心。含矿原始地层和后期邻近膏盐盆地及其边缘深源断裂构成成矿多元结构模式(图3)。典型实例如广东凡口铅锌矿、四川天宝山铅锌矿等。

### (4) 火山热液型矿床

此类矿床实质上是火山岩喷发期后热液成矿作用形成的,由火山机构相关的次火山岩体顶部形成成矿作用中心,浅部发育强烈的面状热水酸碱蚀变,分为2类:一类以明矾石、叶蜡石、高岭石等酸性蚀变岩为主;另一类以冰长石、沸石等碱性蚀变岩为主。具有典型的酸碱转换结构,氧化还原转换矿

物标志明显。爆破角砾岩体、次火山岩脉发育,在火山机构附近以陡倾斜脉状矿体、爆破角砾岩矿体为主。深部在次火山岩体顶部接触面、火山岩和沉积岩(包括沉积凝灰岩类)接触面可能形成由流体混合交代作用形成的缓倾斜厚大似层状,以及由水压裂隙形成的细脉浸染型层块状矿体。矿化样式出现显著转变,存在明显的上脉下层的二元结构模式,典型矿床如山西支家地铅锌银矿、福建紫金山金铜矿、江苏梅山铁矿、大兴安岭北段的得尔布尔铅锌矿(图4)、七一铅锌矿、东裙铅锌矿、四川平川铁矿等。

### (5) 海相火山喷流沉积型矿床

此类矿床属于大规模火山喷发期后形成的矿床。在岛弧构造背景下,中酸性火山岩易于成矿,次火山岩体顶部及其喷发间断面是成矿作用中心。浅部在沉积岩和火山岩接触面上,形成厚大透镜状、层状矿体;深部围绕次火山岩体形成脉状、浸染状矿体,呈蘑菇状。在造山带环境下,由于构造变动,浅部常出现脉状浸染型矿体,在火山岩和沉积岩接触面存在隐伏似层状矿体,矿化类型存在显著的上层下脉的多元结构模式。同时,常见由岩浆水和海水混合作用形成的重晶石、石膏等硫酸盐岩层。

此类型的矿床中国主要分布在造山带,由于强烈的区域构造运动,在平面上形成典型的左右结构,火山岩和沉积岩接触面上形成层状、似层状矿体,火山岩一侧常见次火山岩体及脉状矿体。典型实例如新疆卡拉塔格铜锌矿和阿舍勒铜锌矿、四川呷村铅锌矿、甘肃白银厂铜铅锌矿等。在大洋中脊构造背景下,基性火山岩有关矿床和枕状熔岩密切相关,深部有层状基性侵入岩和岩墙,如甘肃九个泉铜矿(图5)。

### (6) 接触交代型矿床

浅部以侵入体接触带矿体为主,侵入体外接触带毗邻或深部存在隐伏“硅钙面”,形成缓倾斜似层状矿体。接触带和热流体范围内的“硅钙面”构成成矿作用中心,如安徽铜山铜矿、福建洛阳铁矿。如果存在背形构造或叠加同生断裂,深部必有规模较大的矿体,如湖南康家湾铅锌矿、黑龙江弓棚子铜矿、安徽铜山铜矿。如果岩体深部存在带状展布的捕虏体,同样形成规模较大的矿体,如湖北大冶铁铜矿、安徽姚家岭铜多金属矿,存在典型的深浅或左右多元结构模式,交代矿物形成显著的时空二

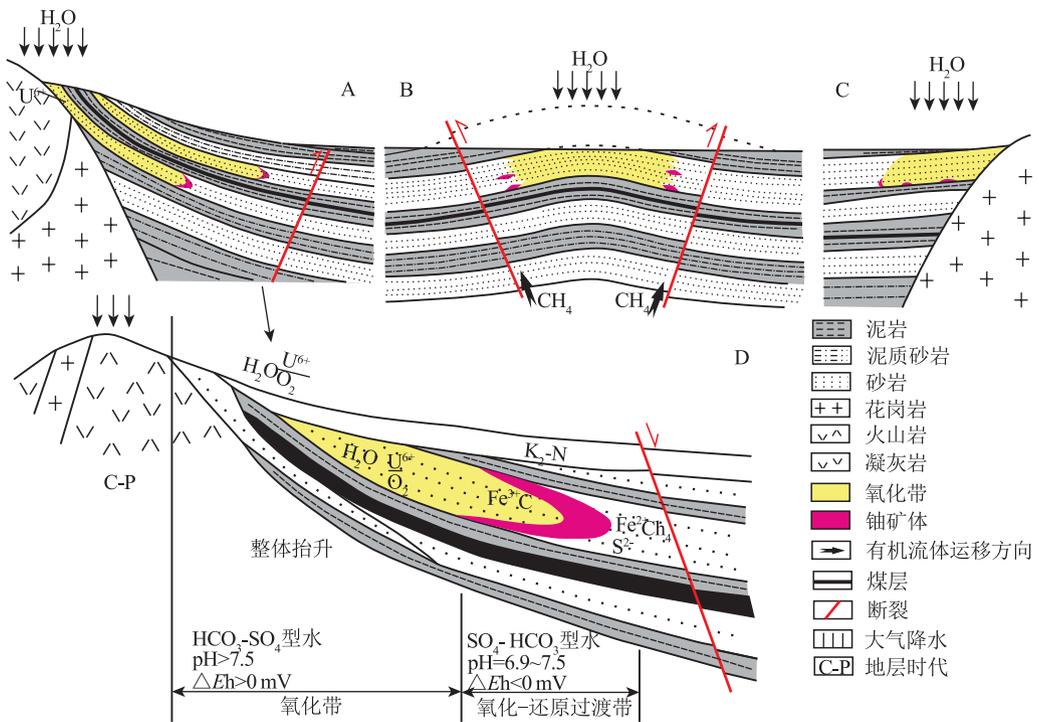


图 2 砂岩型铀矿找矿预测地质模型(据蔡煜琦等,2013)

Fig. 2 Geological model for prospecting and prediction of sandstone-type uranium deposit

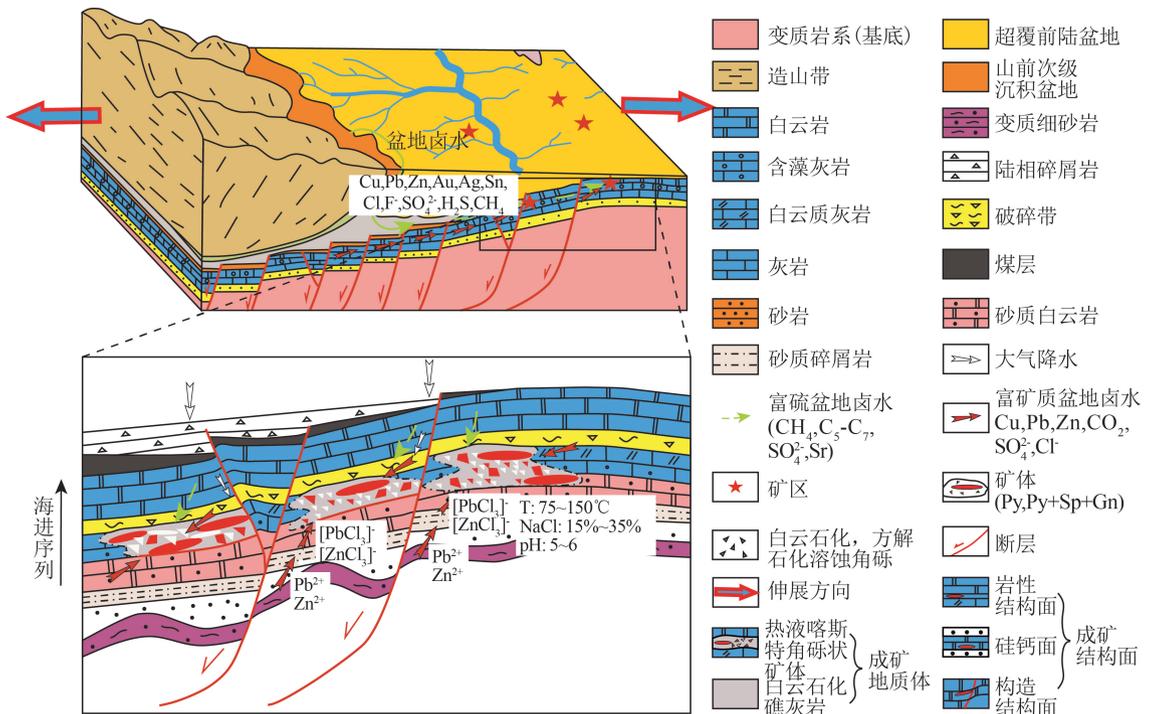


图 3 碳酸盐岩容矿的非岩浆后生热液型铅锌矿找矿预测地质模型(据韩润生等,2012)

Fig. 3 Geological model for prospecting prediction of non magmatic epigenetic hydrothermal lead-zinc deposits hosted by carbonate rocks

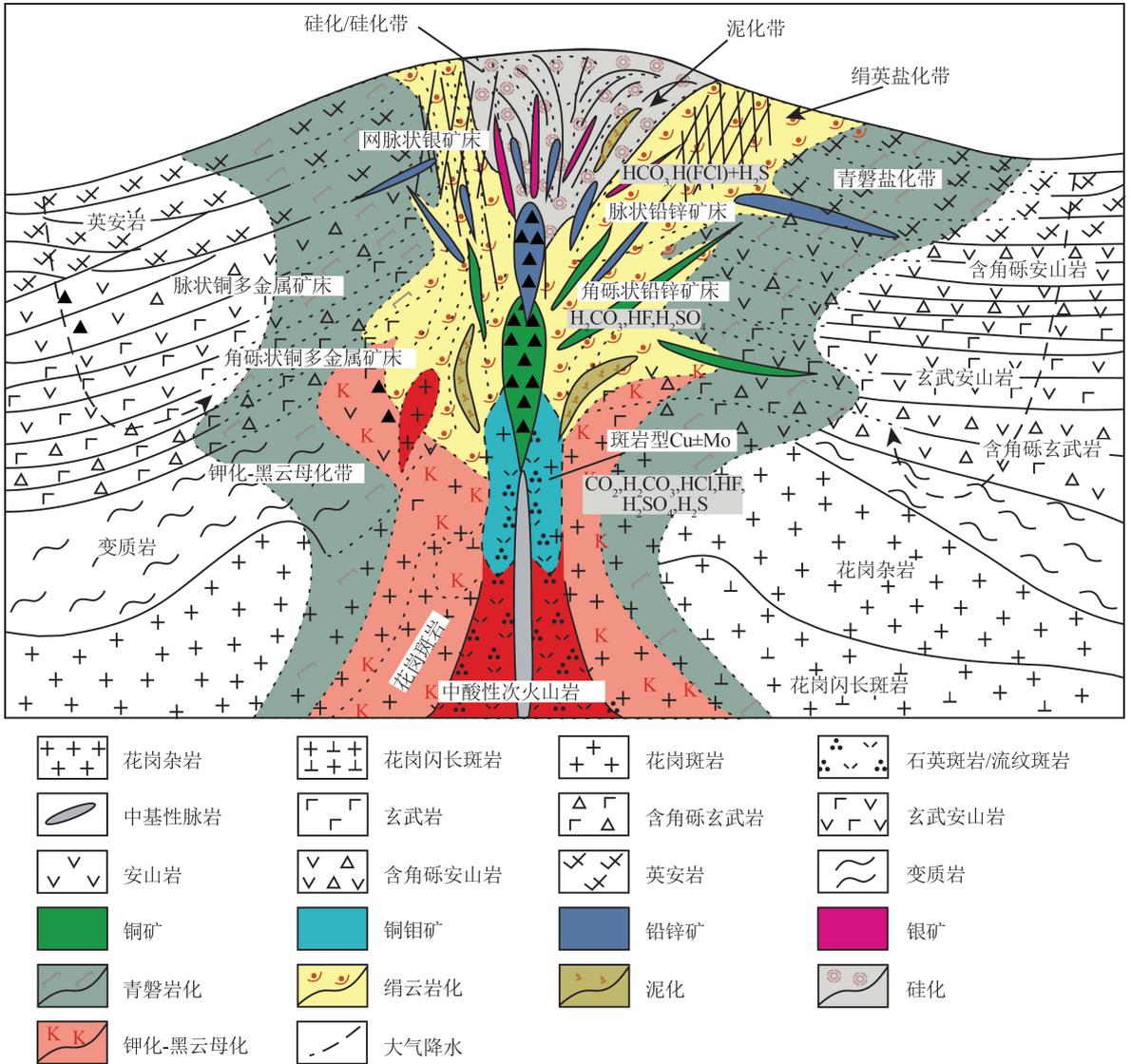


图4 陆相次火山岩型铅锌银多金属矿床找矿预测地质模型(据叶天竺等,2017)

Fig. 4 Geological model for prospecting and prediction of continental subvolcanic lead-zinc silver polymetallic deposit

元结构,成矿早期为钙硅酸盐矿物,成矿期为绿泥石、绢云母等含水矿物。

#### (7) 斑岩型铜钼矿床

斑岩型铜钼矿床岩体顶部接触带是成矿作用中心。根据剥蚀程度,斑岩矿体外围和浅部为脉状或层状、似层状铅锌、铜(金)矿,深部为斑岩型铜钼矿,构成典型的深浅多元结构模式或者平面分带模式。典型实例如云南澜沧铅锌铜钼矿、广东大宝山铅锌铜钼矿、湖南东坡铅锌钨矿、西藏驱龙铜钼矿、西藏甲玛铜多金属矿等(图6)。

浅部发育青磐岩化、黑云母角岩化、高岭石化

等酸性蚀变带,深部发育钾长石化等碱性蚀变,中部矿体部位为硅化、绢云母化。就斑岩型矿床而言,还存在以成矿岩体为界的内外多元结构。在高氧逸度条件下,深部可保留高温硬石膏。

#### (8) 高温热液型钨锡矿床

此类矿床侵入体顶部内外接触带是成矿作用中心。浅部为陡倾斜脉状矿体,一般分布于内接触带300~500 m以内,外接触带1300~1500 m以内。部分矿床浅部围岩内形成脉状矿体,深部接触带为似层状浸染型矿体,构成典型的矿化样式多元结构模式。矿体顶部常见萤石化或电气石化,近矿围岩

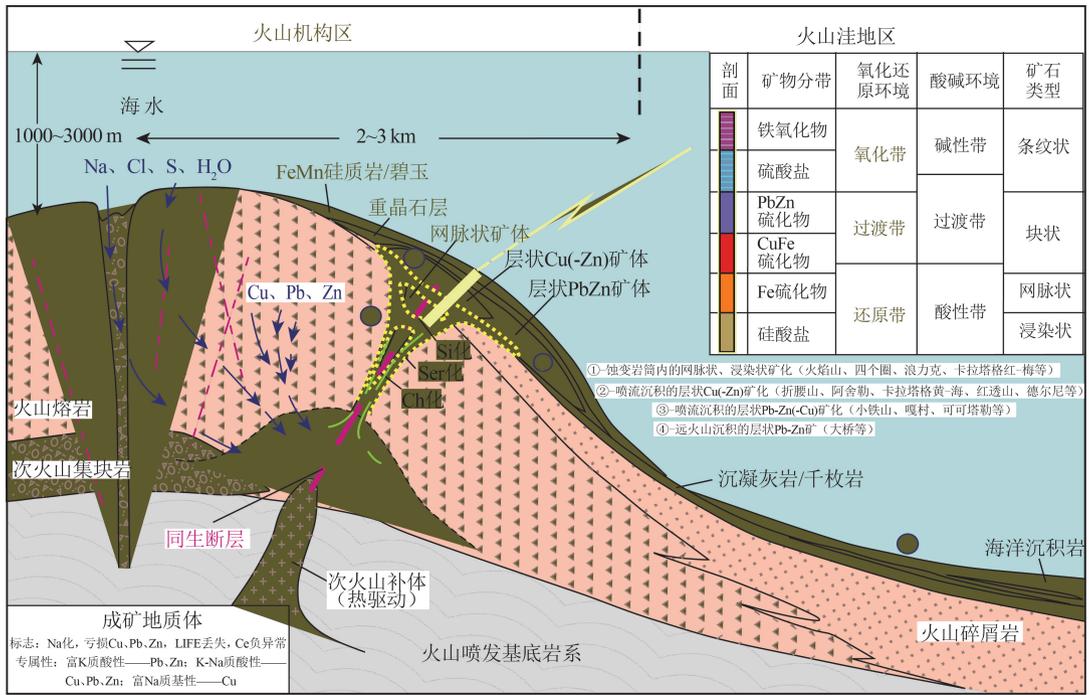


图 5 中国 VMS 型矿床找矿预测地质模型(据叶天竺等,2017)

Fig. 5 Geological model for prospecting prediction of VMS-type deposits in China

为云英岩化,具有蚀变分带特征,如赣南钨矿、广西栗木锡矿等。

(9) 中低温热液脉状矿床

此类矿床主要包括脉状金、银、铜、铅、锌、铋等硫化物矿床。成矿作用类型可分 2 种:第一种属于陆相火山热液型、斑岩型矿床的伴生矿化样式,成矿作用中心为次火山岩体及浅成侵入体顶部接触带;第二种属于中浅(>3~4 km) 侵位的侵入体,成矿作用中心在侵入体顶部外接触带 2~3 km 内形成,具体位置受氧化还原界面、地下水渗滤界面、成矿构造、特殊岩性及其接触面等控制。

(10) 沉积变质型矿床

成矿作用中心受褶皱轴部、转折端、轴向转变部位控制。浅部为层状矿体,深部受向型构造轴部控制,构成多元结构模式,如河北迁安铁矿、海南石碌铁矿、辽宁弓长岭铁矿等。

(11) 韧性剪切带型金矿床

该类型矿床和热液脉状金矿床具有完全相同的特征。深部矿体大多受脆性断裂构造侧伏规律控制,如江西金山金矿等。

(12) 岩浆型矿床

矿体主要赋存于岩体底部和侧伏端,构成成矿作

用中心。造山带环境下形成的岩浆型铬铁矿和铜镍硫化物矿床往往受叠加在岩体上的成矿同时性构造所控制,如西藏罗布莎铬铁矿、吉林红旗岭镍矿、河北黑山铁矿等。部分受岩体侧伏端控制,但同样存在多元结构模式,如吉林长仁镍矿等(图 7)。

8 勘查区找矿预测基本方法

以地质调查研究为主,结合物探、化探、计算机等技术应用,开展勘查区找矿预测(图 8)。

8.1 总体原则

勘查区找矿预测工作方法必须遵循如下原则:宏观调查和微观研究相结合,基础研究和综合研究相结合,地质研究和物探、化探方法应用相结合。

8.2 找矿预测预研究

预研究主要内容包括:全面收集资料,编制工作程度图;勘查区基本地质特征分析;勘查区找矿预测工作程度分类;深部找矿可能性分析;编制工作方案。

8.3 基本工作程序

8.3.1 确定矿床类型

确定矿床类型是找矿预测的基础工作,关系到找矿预测的成败。按照找矿预测矿床类型划分方

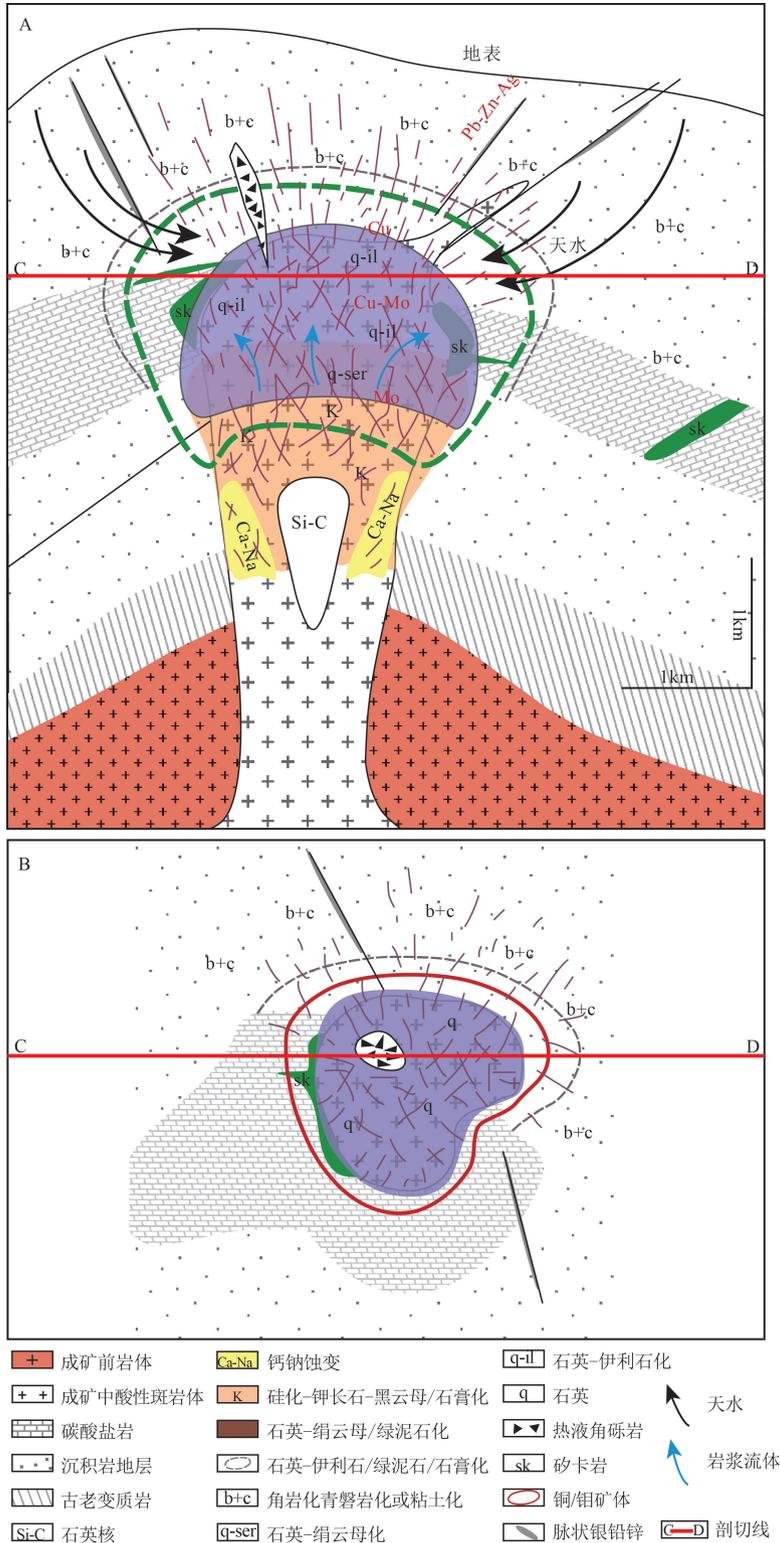


图 6 斑岩型钼-铜矿床找矿预测地质模型(据秦克章等,2014)

Fig. 6 Geological model for prospecting prediction of porphyry Cu-Mo deposit

A—剖面;B—平面

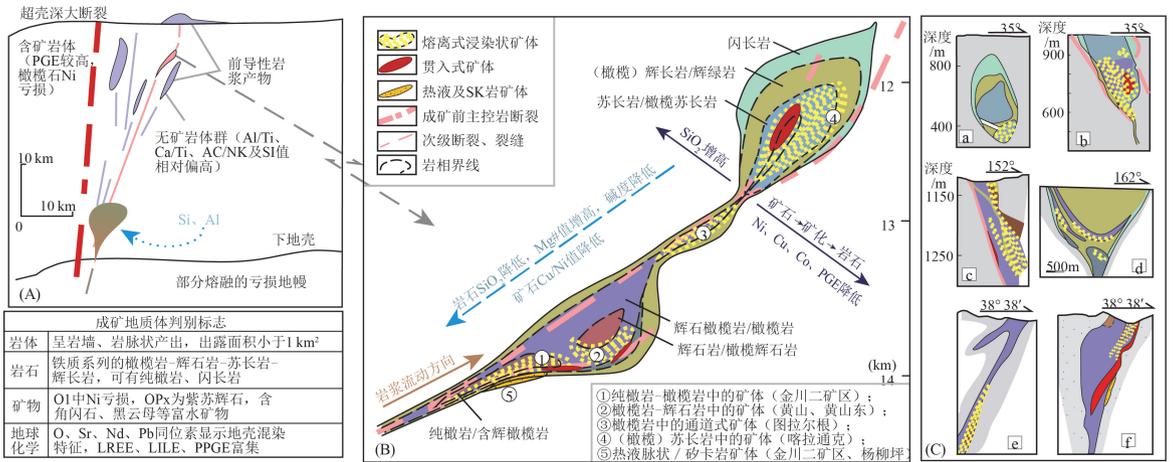


图 7 中国岩浆型铜镍矿找矿预测地质模型示意图(据王玉往等,2013;叶天竺等,2017 修改)

Fig. 7 Schematic diagrams of geological model for prospecting and prediction of magmatic copper nickel deposits in China A—岩浆铜镍矿构造—成矿模式;B—岩体与矿体空间关系;C—代表性矿床剖面;a—新疆喀拉通克 2 号岩体(据邹海洋等,2001);b—新疆喀拉通克 1 号岩体(据潘长云等,1994);c—新疆图拉尔根(据孙赫等,2008);d—新疆黄山东(据夏明哲等,2010);e—甘肃金川二区 4 线(据甘肃省地质矿产局第六地质队,1984);f—甘肃金川一区 14 线(据甘肃省地质矿产局第六地质队,1984)

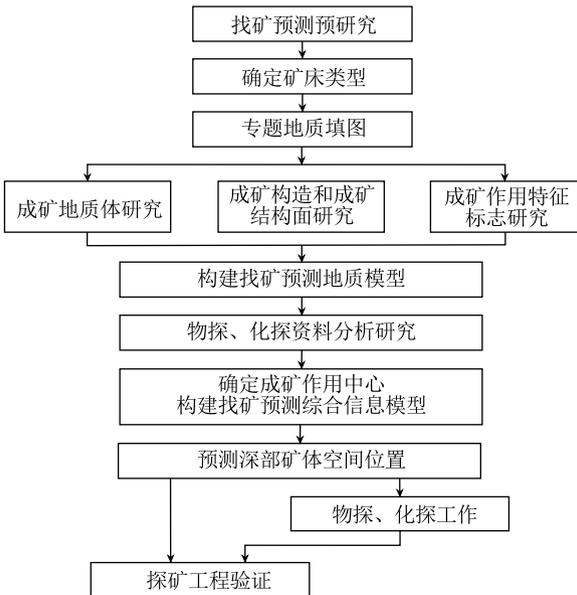


图 8 勘查区找矿预测工作流程图

Fig. 8 Flow chart of prospecting and prediction in exploration area

案,根据勘查区地层、构造、岩浆岩、矿化蚀变等基本地质特征,确定矿床类型。同时,可以按照区域成矿带中相同成矿地质背景下的典型矿床进行类比。由于各种矿床类型受大地构造环境直接控制,不同的大地构造环境形成相应的矿床类型,确定矿床类型时应考虑成矿地质背景条件。

### 8.3.2 成矿地质体、成矿构造与成矿结构面、成矿作用特征标志研究

研究内容前已述及。具体工作方法要点如下。

(1)填(编)制勘查区找矿预测专题图件:根据各种矿床类型,填(编)制相关勘查区岩性构造图件。在开展专题填图时,应充分利用勘查区原有的填图资料、矿产勘查资料、综合研究资料、专题研究资料及其他相关资料。

(2)针对研究成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征标志的科学问题,进行专项修测、填图,在勘查区岩性构造专题图上,把上述三方面标志的具体内容突出表示。

(3)综合分析勘查区物化探资料:①分析深部隐伏岩体、隐伏构造;②分析直接找矿线索;③必要时,扩展到勘查区外围,确认成矿地质体具体空间位置,对隐伏成矿地质体也须推测其空间位置。

(4)按照不同矿床类型通过综合分析构建多元空间结构模式,利用浅部已知成矿作用特征标志,推测深部或下部或成矿地质体内隐伏矿体及其可能的矿化样式。

### 8.3.3 构建找矿预测地质模型

“三位一体”找矿预测地质模型由两部分构成:第一部分,由成矿地质体和成矿结构面构成的矿床空间结构,大中型矿床都存在或深浅、或上下、或

左右、或成矿地质体内外分布的矿化样式,具有显著区别的“二元”结构;第二部分为成矿作用特征标志,成矿作用特征标志是判断矿体深部、成矿地质体内接触带矿化样式的具体标志,在浅部、上部、隐伏岩体外接触带与浅部矿化-蚀变带共伴生,根据成矿强度、分布范围、标型蚀变矿物组合等标志预测深部矿体。进而按照上下、浅深、左右、内外矿体空间结构模式构建“三位一体”找矿预测地质模型。

#### 8.3.4 预测深部矿体空间位置

(1)根据常见矿床类型找矿预测地质模型类比分析,推测勘查区找矿预测地质模型的空间格架特征,确定深部矿体存在的可能性。

(2)通过成矿作用特征标志研究判断成矿地球化学障,确定成矿作用中心位置及具体结构面,预测深部矿体空间位置。

#### 8.3.5 物探化探工作

由找矿预测地质模型推测或预测的矿体深部靶点,有的可以直接布置验证工程,有的则需要部署物探化探工作,通过定量反演进一步确定工程验证位置。尤其对于深部矿体预测,需要采用深部物探(例如电磁法),为确定验证工程位置提供重要信息。

#### 8.3.6 探矿工程验证

未经过工程验证的预测只有通过工程验证才能实现找矿突破。在探矿工程验证过程中,经常出现反复和曲折。由于地质现象的复杂性,对深部成矿特征认识的不确定性,只有通过探矿工程验证才能进一步得到修正,逼近事实。因此,初期验证的失败是可以接受的,通过再研究进一步开展验证工作,但前提是必须有新的认识,同时要考虑有限的财力所能承受的限度范围。

深部找矿风险巨大,勘查工作者主观上认为深部有大矿,但客观上往往大矿的发现是极少数的,找矿突破的成功率极低。一个严酷的事实是,验证工程的失败是由于开展找矿预测工作过程中勘查思路不正确、采用技术方法不当造成的。前期工作不扎实,专题研究不到位,工作方法细节的失误等主观原因均可造成验证工程没有取得预期效果。

因此,无论原有勘查工作程度如何,都应按照成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征标志构建找矿预测地质模型,思考问题,开展预

测工作。成矿地质体找矿预测理论的应用、“三位一体”地质模型结构分析和构建,不仅仅是找矿突破技术层面上的工作内容,更重要的是技术思路和找矿思路。任何勘查项目,从工作开始,都应按照这三方面内容,形成一定的找矿思路,随着勘查工作的进展,三项内容构成的找矿预测地质模型应当对找矿突破起到不可替代的作用。

## 9 结论

(1)成矿地质体找矿预测理论是以元素地球化学特征和成矿地质作用的关系为切入点,以成矿物质形成、迁移、沉淀、集聚为研究对象,以成矿过程中的普遍规律作为找矿预测标志,揭示成矿作用机制,按矿床类型构建找矿预测地质模型,解决找矿标志的不确定性问题。

(2)成矿地质体指形成矿体(床)的成矿地质作用的实物载体,即导致成矿物质沉淀集聚、对形成主要工业矿体空间定位起关键作用的成矿作用要素组合。根据成矿地质作用将成矿地质体分为沉积盆地和沉积建造、火山岩组合和火山构造、侵入岩体、变质建造和变形构造、大型变形构造带和复合型地质体6类。

(3)成矿结构面指矿体赋存的空间位置,包括构造界面、岩性界面、物理化学转换界面。根据成矿作用动力来源分为原生成矿结构面和次生成矿结构面。

(4)成矿作用特征标志指应用成矿地球化学理论研究总结归纳的、由元素基本地球化学特征确定的、显示成矿作用过程的综合标志。

(5)“三位一体”找矿预测地质模型,是通过成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征标志等内容的专项研究工作,按照三维二元结构特征而建立的表达勘查区已知和推测矿体(床)全部地质特征的实体模型,直接用于预测矿体位置和可能规模,并为部署探矿工程提供依据。

该理论在成矿找矿理论方法方面有如下创新:运用成矿作用时(间)、空(间)、物(质)、能(量)一体化研究,创建了成矿地质体研究理论。首次提出“成矿地质体”的概念,明确矿床研究与勘查关键地质要素。运用成矿作用与构造的关系,创建了成矿结构面研究理论与方法。其内容包括成矿构造、重要的岩性界面、地球化学界面等,明确了不同类型

矿床的矿体聚集空间与矿化样式。应用地球化学基础理论,从矿体宏观特征、矿物特征、成矿元素特征3个方面提炼成矿作用特征标志,主要包括矿化特征、蚀变特征、矿化组合、成矿流体、地球化学等方面的信息,总结了成矿元素迁移沉淀的机制,为勘查区找矿预测提供了理论基础。通过成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征标志、空间模型结构研究,创建了“三位一体”勘查区找矿预测理论方法体系。

总体上,该理论方法体系能提高勘查区找矿预测的成功概率,在全国危机矿山接替资源找矿、老矿山深部和外围找矿、整装勘查区实施中,得到广泛应用和推广,有效地缓解矿山资源危机,经济效益和社会效益显著。相信通过进一步推广应用,在新一轮找矿突破行动中发挥更大的作用。

**致谢:**成矿地质体找矿预测理论与方法,主要由承担危机矿山找矿专项典型矿床及成矿规律总结研究项目的中青年科研团队共同创建的,是集体智慧的结晶。自然资源部矿产勘查技术指导中心作为核心团队,联合中国科学院地质与地球物理研究所秦克章、范宏瑞、曾庆栋,中国地质科学院地质力学研究所陈正乐,南京大学倪培,中国地质大学(北京)张德会、李胜荣、刘家军,中国地质大学(武汉)姚书振、蒋少涌、张钧,吉林大学孙丰月、孙景贵,昆明理工大学韩润生,核工业北京地质研究院蔡煜琦等十几个单位100余名科研人员,在此一并表示感谢。

## 参考文献

Bonham H F J. Models for volcanic-hosted epithermal precious metal deposits: A review [C]//Volcanism, hydrothermal systems and related mineralization. International Volcanological Congress, 1986: 13-17.

Kyle J R, Li N, Jackson K G. Jinding: A giant Tertiary sandstone hosted Zn-Pb deposit, Yunnan, China [J]. Society of Economic Geologists, 2002, (50): 9-16.

Paradis S, Hannigan P, Dewing K. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits [J]. Mineral Deposits of Canada, 2007, (5): 185-203.

蔡煜琦,徐浩,郭庆银,等.江西省桃山地区花岗岩型铀矿预测及找矿方向[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(4): 1283-1291.

陈建平,陈勇,朱鹏飞,等.数字矿床模型及其应用——以新疆阿勒泰地区可可托海3号伟晶岩脉稀有金属隐伏矿预测为例[J].地质通报,2011,30(5): 630-641.

陈毓川,王登红,徐志刚,等.阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律[M].北京:原子能出版社,2002..

陈辉,林鲁军,庞振山,等.四川会理拉拉铜矿找矿预测模型构建与找矿示范[J].地质前缘,2021,28(3): 309-327.

成秋明,赵鹏大,陈建国,等.奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用:成矿弱信息提取和复合信息分解[J].地球科学(中国地质大学学报),2009,34(2): 232-242.

丁建华,肖克炎,姜德波,等.大比例尺三维矿产预测[J].地质与勘探,2009,45(6): 729-734.

范永香,阳正熙.成矿规律与成矿预测[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.

胡惠民.谈大比例尺矿产预测[J].中国地质,1992,(10): 4-7.

胡惠民.大比例尺成矿预测方法[M].北京:地质出版社,1995.

韩吟文,马振东,张宏飞,等.地球化学[M].北京:地质出版社,2003.

韩润生,胡煜照,王学昆,等.滇东北富锗银铅锌多金属矿集区矿床模型[J].地质学报,2012,86(2): 280-294.

黄宗理,张良弼.地球科学大辞典——应用学科卷[M].北京:地质出版社,2005.

贾德龙,张志辉,姚磊,等.浙江漓渚铁矿“硅钙面”成矿机制探讨[J].地质论评,2015,61(S1): 487-488.

吕志成,陈辉,宓奎峰,等.勘查区找矿预测理论与方法及其应用案例[J].地质力学学报,2022,28(5): 842-865.

李红阳,李英杰,杨秋荣,等.铜陵矿集区块状硫化物矿床的二元结构特征[J].地质与勘探,2006,42(3): 8-11.

李顺庭,祝新友,王京彬,陆相次火山岩型矿床研究评述[J].矿床地质,2014,33(S1): 705-706.

刘英俊,曹励明,李兆麟,等.元素地球化学[M].北京:科学出版社,1984.

毛景文,张作衡,裴荣富.中国矿床模型概论[M].北京:地质出版社,2012.

斯米尔诺夫 B И.矿床地质学[M].《矿床地质学》翻译组,译.北京:地质出版社,1985.

庞振山,薛建玲,程志中,等.成矿地质体找矿预测理论与方法在找矿预测中的应用[J/OL].地质通报,2023, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20230113.1340.002.html>.

潘长云,王润民,赵昌龙.新疆喀拉通克 Y1 含矿岩体的岩石化学特征及其与成矿的关系[J].岩石学报,1994,10(3): 261-274.

秦克章,夏代祥,李光明,等.西藏驱龙斑岩-夕卡岩铜钼矿床[M].北京:科学出版社,2014.

秦克章,赵俊兴,范宏瑞,等.试论主要类型矿床的形成深度与最大延深垂幅[J].地质前缘,2021,28(3): 271-294.

孙赫,秦克章,李金祥,等.地幔部分熔融程度对东天山镁铁质—超镁铁质岩铂族元素矿化的约束——以图拉尔根和香山铜镍矿为例[J].岩石学报,2008,24(5): 1079-1086.

孙文珂.开展矿产预测的几个问题[J].中国地质,1988,(6): 14-17.

舒斌.含金韧—脆性断裂中界面转换成矿机制探讨[J].地质与资源,2005,(3): 219-222.

唐菊兴,邓世林,郑文宝,等.西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床勘查模型[J].矿床地质,2011,30(2): 179-196.

王世称.综合信息矿产预测理论与方法体系新进展[J].地质通报,2010,29(10): 1399-1403.

王嘉玮,朱裕生.界面成矿探讨[J].中国地质,2019,46(1): 77-86.

- 王玉往,叶天竺,王京彬,等.我国主要矿床类型划分及成矿谱系架构初探——以危机矿山矿床为例[J].矿物学报,2009,29(S1): 487-488.
- 王玉往,王京彬,李德东,等.新疆北部幔源岩浆矿床的类型、时空分布及成矿谱系[J].矿床地质,2013,32(2): 223-243.
- 王安建,曹殿华,高兰,等.论云南兰坪金顶超大型铅锌矿床的成因[J].地质学报,2009,83(1): 43-54.
- 吴承烈.中大比例尺矿产预测中几个问题的探讨[J].中国地质,1988,(12): 28-30.
- 夏明哲,姜常义,钱壮志,等.新疆东天山黄山东岩体岩石地球化学特征与岩石成因[J].岩石学报,2010,26(8): 2413-2430.
- 肖克炎,朱裕生.矿产资源 GIS 定量评价[J].中国地质,2000,(7): 29-32.
- 肖克炎,娄德波,孙莉,等.全国重要矿产资源潜力评价一些基本预测理论方法的进展[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(4): 1073-1082.
- 薛建玲,庞振山,程志中,等.深部找矿基本问题及方法[J].地质通报,2020,39(8): 1125-1136.
- 叶天竺,肖克炎,严光生.矿床模型综合地质信息预测技术研究[J].地学前缘,2007a,(5): 11-19.
- 叶天竺,薛建玲.金属矿床深部找矿中的地质研究[J].中国地质,2007b,34(5): 855-869.
- 叶天竺,吕志成,庞振山,等.勘查区找矿预测理论与方法(总论)[M].北京:地质出版社,2014.
- 叶天竺,韦昌山,王玉往,等.勘查区找矿预测理论与方法(各论)[M].北京:地质出版社,2017.
- 赵鹏大.矿产资源总量预测的若干问题[J].中国地质,1984,(1): 1-4.
- 赵鹏大,陈建平,张寿庭.“三联式”成矿预测新进展[J].地学前缘,2003,10(2): 455-463.
- 赵伦山,张本仁.地球化学[M].北京:地质出版社,1988.
- 邹海洋,戴塔根,胡祥昭.喀拉通克铜镍硫化矿地质特征及找矿预测[J].地质地球化学,2001,29(3): 70-75.
- 张德会,赵伦山.地球化学[M].北京:地质出版社,1992.
- 张德会.热液成矿作用地球化学[M].北京:地质出版社,2020.
- 朱裕生,肖克炎,丁鹏飞,等.成矿预测方法[M].北京:地质出版社,1997.
- 朱裕生.矿产预测理论——区域成矿学向矿产勘查延伸的理论体系[J].地质学报,2006,(10): 1518-1527.
- 于晓飞,吕志成,孙海瑞,等.全国整装勘查区成矿系统研究与矿产勘查新进展[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(5): 1261-1288.