

doi:10.3799/dqkx.2011.024

# 内蒙花敖包特 Pb-Zn-Ag 多金属矿床原生晕分带特征与深部矿体预测模型

陈永清<sup>1</sup>, 韩学林<sup>2</sup>, 赵红娟<sup>1</sup>, 程志中<sup>3</sup>, 唐宇<sup>4</sup>, 陈武<sup>1</sup>

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 山东省地质科学实验研究院, 山东济南 250013

3. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000

4. 中国地质矿产经济研究院, 河北三河 101601

**摘要:** 花敖包特 Pb-Zn-Ag 多金属矿床构造上位于滨西太平洋成矿域内蒙古大兴安岭成矿带南段, 是一个近年来发现的与白垩纪早期构造岩浆活动有关的隐伏热液脉状矿床. 研究表明: (1) 矿体原生晕发育, 且分带明显. 据其异常强度建立的元素横向分带顺序(从强到弱)为 Cd→Pb→Zn→Ag→Sb→In→Hg→As→Cu→Sn→W→Mo→Bi, 排在序列前面的 Cd、Pb、Zn、Sb、Ag 等 5 种元素, 可作为远矿指示元素; 排在序列后端的 As、Bi、Mo、W 等 4 种元素, 可作为近矿指示元素. (2) 根据 Grigorian 原生晕分带计算方法, 获得矿体原生晕轴向分带序列(自矿体头部至尾部)为 Sb→Pb→Cd→Ag→Zn→Hg→Cu→In→As→Bi→Sn→Mo→W, 与 Grigorian 建立热液矿床标准分带基本一致. (3) 构建深部矿体找矿模型, 其预测评价指标  $(Sb \times Pb \times Cd \times Ag)_D / (As \times Sn \times Mo \times W)_D$  在矿体头部为 1.30、矿体中上部为 0.35、矿体中下部为 0.056、矿体尾部为 0.005, 这表明该指标随深度的增加有规律地降低, 是预测深部矿体资源潜力的有效指标.

**关键词:** 花敖包特铅锌银矿床; 原生晕分带; 深部矿体预测模型; 成矿带; 中国东北.

**中图分类号:** P628; P618.4

**文章编号:** 1000-2383(2011)02-0236-11

**收稿日期:** 2010-09-12

## Characteristics of Primary Halo Zonation and Prediction Pattern of Deep Orebody of the Huaobaote Pb-Zn-Ag Polymetallic Deposit, Inner Mongolia

CHEN Yong-qing<sup>1</sup>, HAN Xue-lin<sup>2</sup>, ZHAO Hong-juan<sup>1</sup>, CHENG Zhi-zhong<sup>3</sup>, TANG Yu<sup>4</sup>, CHEN Wu<sup>1</sup>

1. School of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Shandong Institute and Laboratory of Geological Sciences, Jinan 250013, China

3. Institute of Exploration Geophysics and Geochemistry, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China

4. China Institute of Geological and Mineral Economy, Sanhe 101601, China

**Abstract:** The Huaobaote Pb-Zn-Ag polymetallic deposit, tectonically located at the south segment of the Dahinggan Mountains ore-forming belt of the circum-western Pacific metallogenetic domain, is a buried hydrothermal vein deposit associated with early Cretaceous tectono-magma activities discovered in recent years. The following conclusions are drawn by studying on primary halos of ore bodies. (1) The ore and halos forming-elements exhibit a clear zonation. Based on their anomalous intensity the transverse element zonation of the ore deposit are established as follows (from high to low): Cd→Pb→Zn→Ag→Sb→In→Hg→As→Cu→Sn→W→Mo→Bi. The five elements (Cd, Pb, Zn, Ag, Sb) ranked in the front of this zoning sequence can be regarded as long range indicators; and the four elements (Sn, W, Mo, Bi) in the rear of this zoning sequence regarded as short range indicators. (2) The axial zonation of this ore deposits is as follows: Sb→Pb→Cd→Ag→Zn→Hg→Cu→In→As→Bi→Sn→Mo→W, which is similar to the standard zonation of hydrothermal ore deposits determined by S. V. Grigorian. (3) Indexes such as  $(Sb \times Pb \times Cd \times Ag)_D / (As \times Sn \times Mo \times W)_D$  are constructed as a criterion for evaluating the ore potential in depth, which is equal or greater than 1.30 on the top portion of the ore bodies, 0.35–0.056 in the middle-upper portion, 0.056–0.005 in the

**基金项目:** 国家自然科学基金(Nos. 40972232, 40772197); 国家高技术发展“863”计划(No. 2006AA06Z113).

**作者简介:** 陈永清(1960—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事矿产资源定量勘查与评价教学与研究. E-mail: yqchen@cugb.edu.cn

middle-lower portion and equal or lesser than 0.005 at the end portion of the ore bodies, illustrating that the criterion values decrease regularly and abruptly with depth, and they can be used for predicting the ore potentials at a given depth.

**Key words:** Huaaobaote lead-zinc-silver deposit; primary halo zonation; prediction pattern of deep ore bodies; metallogenic belt; northeastern China.

著名矿床地质学家 Sillitoe(2010)研究表明:随着世界人口的增长,人们生活标准的提高以及像中国、印度等发展中国家的迅速工业化和城市化,对矿产资源的需求与日俱增。到2030年每年所需新增铜矿产资源量等于每年新开采一座相当于智利 Escondida 铜矿山(Cu:32.49 Mt, 1.15Cu%)规模的铜矿床。这意味着对某些大宗矿种资源的供不应求矛盾是全球性的、长期的。随着地表矿和浅部矿的逐渐枯竭,尤其是大型、超大型矿床更是鲜有发现于地表或浅部,为了满足人类对矿产资源日益增长的需求,将隐伏和深部矿作为勘查目标的“攻深找盲”、“探边摸底”已成为我国目前实施深部找矿计划的现实的勘查战略(赵鹏大,2007)。自20世纪60年代,内生矿床原生晕分带规律被认为是预测深部矿体(或盲矿体)的一种有效手段以来,该方法已被广泛地应用寻找贵金属和有色金属矿床,并取得巨大成功(刘崇民,2006;李惠等,2010a, 2010b)。尤其是前苏联科学家 Beus and Grigorian(1977)的原生晕分带定量计算方法的问世,将矿床原生晕分带规律和深部矿床预测研究推向量化阶段,大大提高预测精度(Shipulin *et al.*, 1973; Clark, 1987; Zhou, 1989; Konstantinov and Strujkov, 1995; Li *et al.*, 1995a, 1995b; 邵跃,1997;代西武等,2000; Liu and Peng, 2003; Ghavami-Riabi *et al.*, 2008;李惠等,2010a, 2010b)。本文试图通过对花敖包特铅锌银多金属矿床成矿元素原生晕分带序列定量研究,建立深部找矿模型和深部矿体定量评价指标,为研究区深部找矿提供方法工具。

## 1 区域成矿地质背景

花敖包特矿床位于大兴安岭中南段锡林浩特—霍林郭勒多金属成矿带,是新世纪初发现的一个隐伏的大型铅、锌、银多金属矿床(陈伟等,2008)。该成矿带是寻找铅、锌、银多金属矿的有利地段,属于滨西太平洋与古亚洲叠加巨型成矿域的重要组成部分(向伟东等,1998;牛树银等,2008)。该成矿带已发现诸如白音诺尔、黄岗梁、浩布高、道伦大坝等铅、锌、银多金属矿床和铜、钼、钨锡多金属矿床等(图1)。

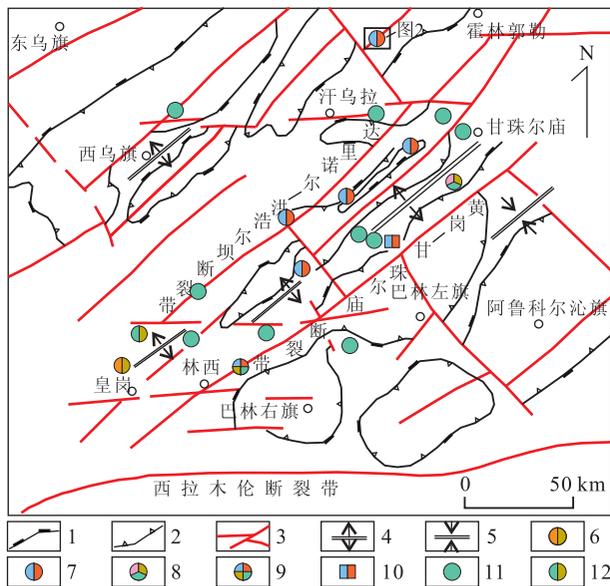


图1 大兴安岭中南段构造与矿产分布(据陈宏威,2007修改)  
Fig. 1 Tectonics and distribution of mineral deposits in the middle-south segment of Dahinggan Mountains

1. 中生代断隆边界;2. 中生代断陷带边界;3. 深大断裂与主要断裂;4. 复背斜轴;5. 复向斜轴;6. 夕卡岩型铁锡矿床;7. 夕卡岩型铅锌多金属矿床;8. 斑岩型银锡铜矿床;9. 热液型银铅锌铜锡矿床;10. 热液型铅锌多金属矿床;11. 热液型铜矿床;12. 热液型铜锡矿床

这些矿床的成矿动力学背景、矿化特征、控矿因素以及成因前人已作过许多研究,认为其是与晚侏罗世—早白垩世太平洋板块活动引起的构造—火山—侵入岩浆活动有关的矿床。区内次火山岩、超浅成侵入体和深成侵入体时空密切相伴的“三位一体”的火山—深成杂岩是主要控矿因素,成矿物质具有地壳深部和幔源物质混合特征(张德全和鲍修文,1990;张德全等,1991;王京彬等,2000;邵济安等,2007;李振祥等,2008, 2009;潘小菲等,2009;周振华,2010)。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 矿区地质特征

矿区地层从老到新为:下二叠统寿山沟组凝灰质粉砂岩、凝灰质细砂岩夹板岩,该组地层为主要的赋矿地层;上侏罗统满克头鄂博组主要为灰紫色酸性含集块角砾凝灰岩、灰白色及紫灰色酸性含角砾凝灰岩、流纹岩,该组地层与寿山沟组地层呈不整合

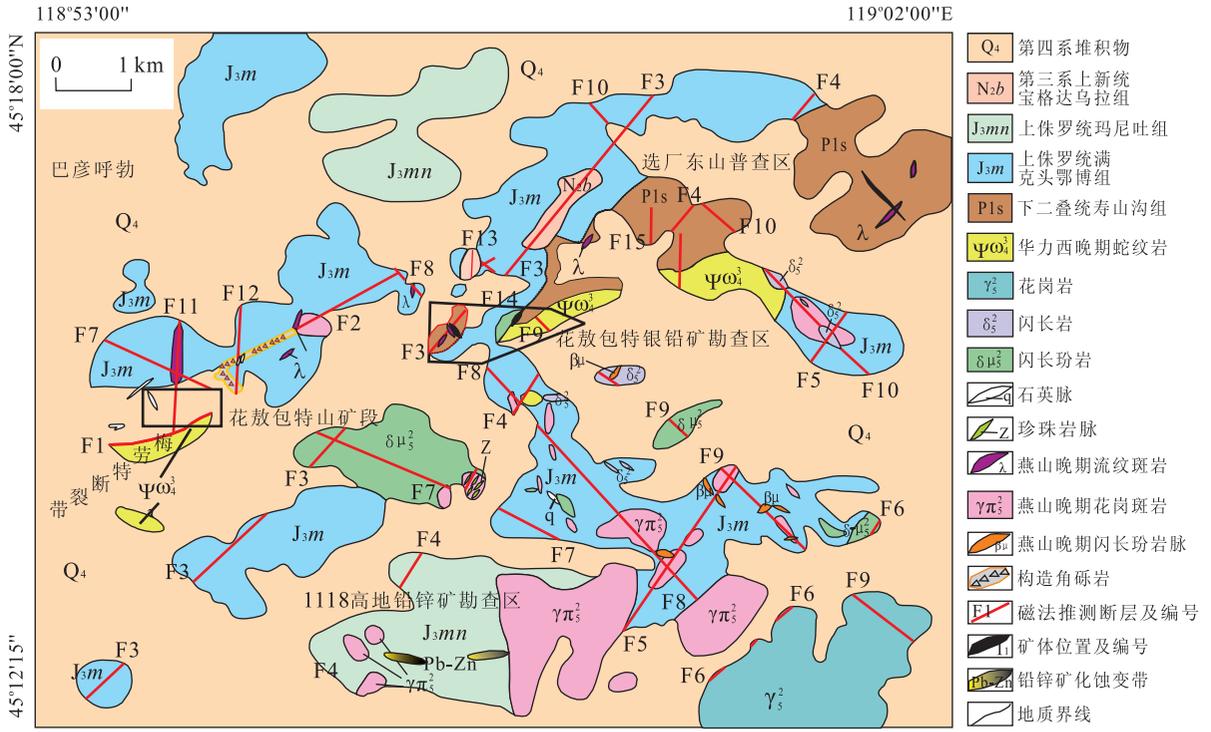


图 2 花敖包特铅锌银矿区地质

Fig. 2 Geology of the Huaaobaote lead-zinc-silver mine district

接触;上侏罗统玛尼吐组安山岩、安山玢岩夹页岩凝灰岩;新近系上新统宝格达乌拉组棕色粉砂质泥岩;第四系在本区较为发育,主要为冲洪积物、冲坡积物、风成沙等(图 2),是研究隐伏矿床找寻技术的理想基地(聂兰仕等,2007)。

矿区出露的侵入岩主要为华力西晚期超基性岩和燕山期中、酸性岩;其中华力西期超基性岩与寿山沟组地层呈断层接触,该接触带为矿体赋存的有利地段。矿区深部发育流纹岩,并伴有铅锌矿化。

区内构造主要为断裂,呈北东向分布的梅劳特深大断裂控制了矿区超基性岩、下二叠统寿山沟组以及赋存于寿山沟组中的花敖包特山矿段和另外两个勘查区的分布。区内北东、北西以及近南北向的断裂控制了矿脉的分布。

### 2.2 矿体特征

铅锌银多金属矿体主要赋存于下二叠统寿山沟组砂岩、碳质粉砂岩北西、北东及南北向的构造破碎带里,主要呈脉状,受断裂构造控制。目前矿区划分 3 个采区,共发现 34 个银、铅、锌多金属矿体。一采区内发现 2 个矿体,编号分别为 I<sub>1</sub>、II<sub>2</sub> 号矿体: I<sub>1</sub> 号矿体走向 50°,倾向南东,倾角 65°~70°,该矿体南西端向下收敛,北东端向下侧伏,矿体呈板柱状; II<sub>2</sub> 号矿体为脉状矿体,严格受北西 330°方向的构造控

制,矿体产状:走向 330°,倾向北东,倾角 65°。二采区发现 18 个矿体,主要赋存于下二叠统寿山沟组地层内,矿体走向为北西向,倾向近北东,倾角 45°~60°,矿体延长 40~90 m,延深 50~200 m,厚度 1.52~5.55 m。三采区矿体倾向 110°~130°,倾角 50°~57°,矿体延长 20~100 m,延深 40~105 m,厚度 1.34~3.71 m。矿体在走向上成群、成束分布,倾向上呈单斜叠瓦状排列。矿体经常与不同性质的各种角砾岩以及次流纹岩体相伴出现,主要矿体以块状、细脉浸染状居多,其他小矿体以浸染状、条带状为主。矿体沿走向和倾向上均有尖灭再现、局部有分支复合现象(图 3)。

围岩蚀变主要有:黄铁矿化、硅化、褐铁矿化、碳酸盐化、绿泥石化、绢云母化、高岭土化等蚀变,其中黄铁矿化、高岭土化、硅化与矿化关系最为密切。

主要矿石矿物为方铅矿、闪锌矿、毒砂及黄铜矿;主要矿物共生组合有:方铅矿—闪锌矿—黄铁矿、方铅矿—深红银矿、方铅矿—闪锌矿、方铅矿—闪锌矿—银黝铜矿、方铅矿—闪锌矿—黄铁矿—毒砂组合等。矿石构造主要为致密块状、细脉浸染状、条带状、角砾状。

### 2.3 成矿阶段划分

由镜下观察各矿物间及矿物集合体之间的交

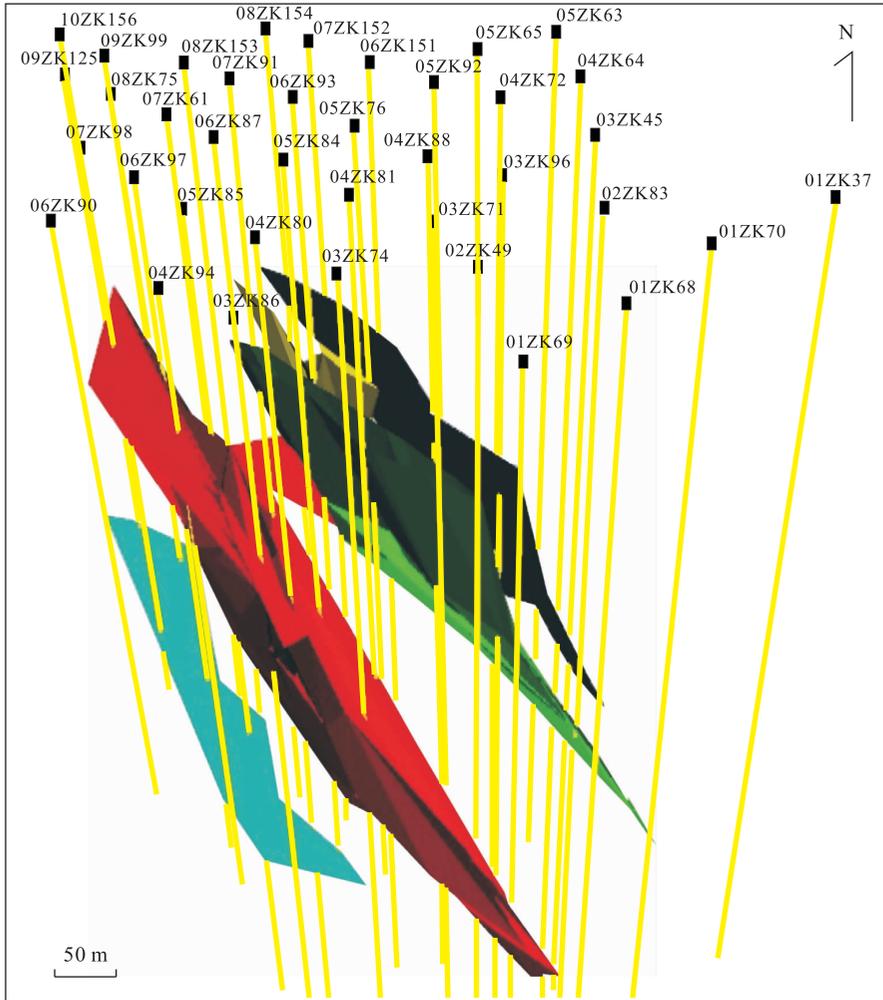


图 3 花敖包特矿床二采区矿体三维分布特征(自左向右依次为 I、II、III、IV 号矿体)

Fig. 3 The three dimensional distribution of ore bodies from the second mining area of the Huaaoabaote Pb-Zn-Ag deposit

代、穿插关系表明,其由早到晚的生成顺序为:具有自形晶的黄铁矿、毒砂(磁黄铁矿)、石英、萤石→闪锌矿、方铅矿(辉银矿、深红银矿)、黄铜矿→具有他形晶的毒砂、黄铁矿(方解石脉、石英脉)。根据矿石中各矿物间的生成顺序,结合前人(李振祥等,2008)研究,将矿化期划归为热液期,共包括 3 个矿化阶段:

(1)自形晶毒砂—黄铁矿—石英阶段:该阶段以自形毒砂、自形黄铁矿和自形石英的沉淀为主。富 Fe、As、S、Ca、F 等的热流体沿断裂空隙运移,在有利场所富集沉淀,形成自形晶毒砂、石英、黄铁矿、萤石等。石英富液相包裹体均一温度为 240.0~270.0℃。

(2)闪锌矿—方铅矿阶段:热液沿断裂向上运移过程中,不断萃取 Ag、Pb、Zn 等成矿元素,富 Ag、Pb、Zn 且含少量 Cu、Fe、Ca、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 的热液沿断裂空隙上升运移,在特定的物理化学条件及有利场所富

集沉淀,主要形成了闪锌矿、方铅矿等;辉银矿、深红银矿则以包体的形式与方铅矿共生,并可见磁黄铁矿、黄铜矿、方解石等;该阶段为主成矿阶段。闪锌矿富液相包裹体均一温度为 205.0~235.0℃。

(3)他形晶毒砂—黄铁矿阶段:由于物理化学条件的改变,流体的含矿性也随之降低,富 Fe、As、S 的流体上升并交代铅锌银矿石,在有利场所富集沉淀,形成他形黄铁矿、毒砂或二者与石英、方解石的脉状集合体。石英富液相包裹体均一温度为 160.0~205.0℃。

上述研究表明,该矿床为中低温热液脉状铅锌银矿床。

### 3 原生晕分带特征

研究原生晕分带的地球化学样品分别采自二采

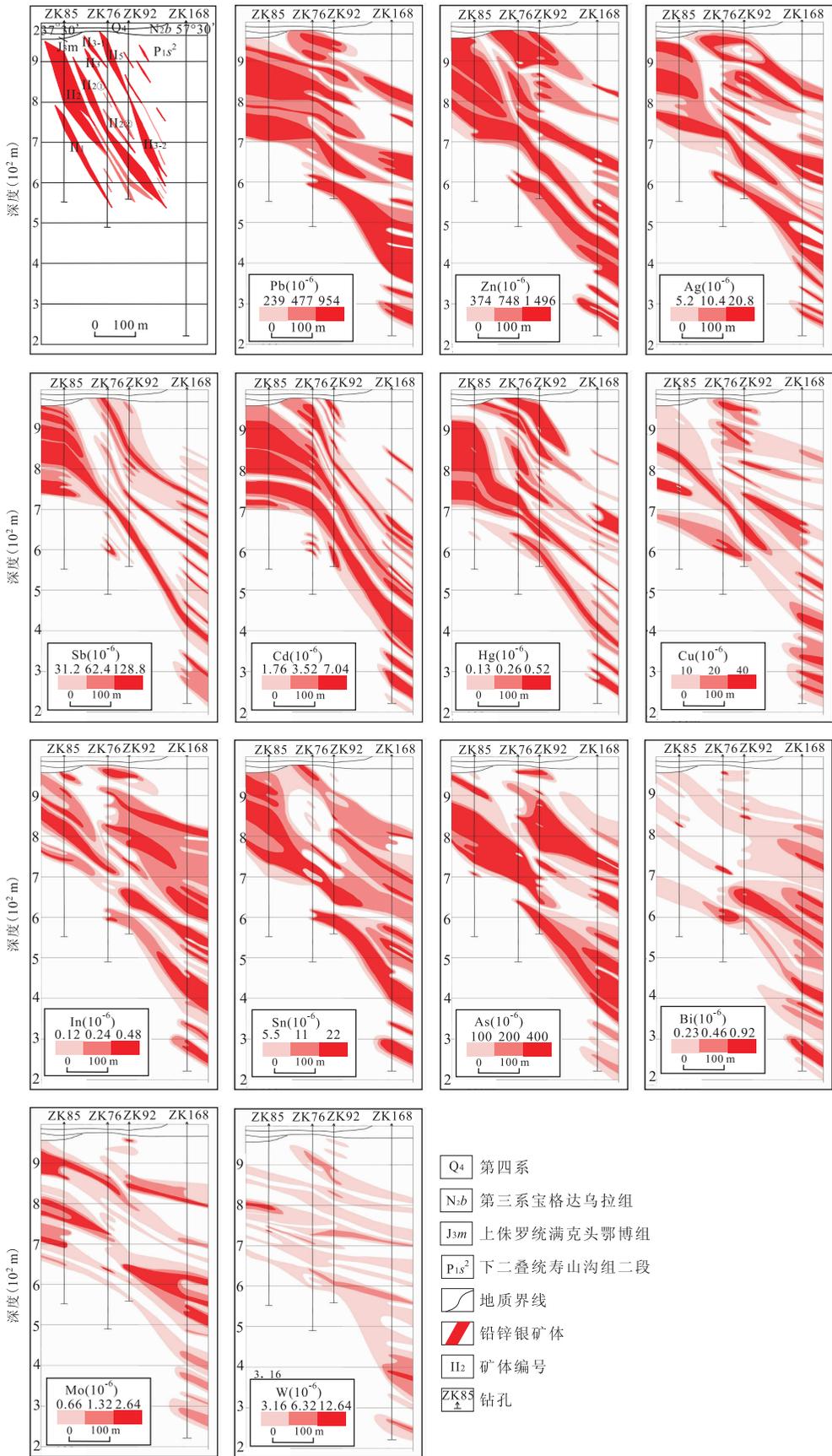


图 4 05 勘探线成矿成晕元素浓度分带

Fig. 4 Zonation of primary halo from the geological section of the No. 05 exploratory line

区 05 勘探线 ZK85、ZK76、ZK92 和 ZK168 四个钻孔岩(矿)心(149 件)和 II<sub>2</sub> 号矿体 15 号井的 4 个中段样品(77 件)(图 4)。

在中国地质科学院廊坊地球物理地球化学勘查研究所岩矿分析实验室定量分析 Cu 和 Zn(ICP-AES), Pb(XRF), As 和 Sb(AFS), Ag(ES), W 和 Mo(POL), Hg, Cd, Sn, Bi 和 In(Me-ICP)等 13 种元素含量,以此数据集作为进一步定量研究原生晕分带的基础。

### 3.1 成晕元素分带

元素异常分带首先以确定异常下限为基础,合理确定原生晕异常下限是原生晕研究中的一个重要方面。对采样分析的各元素按平均值加减二倍的标准离差的原则逐步剔出特异常高值和特异常低值,然后对于所在范围内的元素,再按照平均值加上二倍的标准离差求出异常下限( $Ca$ ),以二倍、四倍的异常下限圈出原生晕的中带( $2Ca$ )、内带( $4Ca$ )(表 1)。

依据上述参数,绘制了各元素异常剖面图(图 4),该图显示以下特征:(1)Sb、Pb、Cd、Ag 4 种元素在矿体头部浓度分带清晰,具有外、中和内 3 个带,结构完整,表明这些元素在矿体头部具有较强的异常强度。而在矿体的中下部以及尾部异常规模变小,表现为原生晕异常内带变窄,且较为分散,其中 Sb、Cd 元素外带与中内带差异明显。这些元素可视为头晕元素。(2)Zn、Hg、In、Cu 4 元素在矿体中上部具有强异常。其中 Zn 和 Hg 元素浓度分带清晰完整,且异常内带发育。In、Cu 元素异常虽在矿体上、中、下均有出现,但高强度异常主要聚集在矿体中部,异常强度随矿体深度的增加均呈逐渐减少趋势。(3)Sn、As、Mo、Bi、W 元素在矿体中下部和尾部异常发育。Sn、As 在矿体上、中、下部均有内带异常出现,但在矿体中下部及尾部元素异常强度最大。Bi 尾晕发育,Mo、W,尤其是 Mo 头、尾晕相对发育,矿体中部异常强度较弱。

根据上述分析,结合原生晕分布特征及其与矿体的关系,定性确立前缘元素为 Sb、Cd、Ag、和 Pb,近矿元素为 Zn、Hg、Cu、In,尾晕元素为 Sn、As、Bi、Mo 和 W。上述元素能够不同程度指示盲矿体的存在(Beaudoin *et al.*, 1987)。

### 3.2 原生晕横向分带序列

横向分带序列反映了成矿成晕作用在水平方向上不同指示元素的强度(异常规模与异常衬度的乘积)差异。横向分带的特征与矿体原生晕中元素的浓度、元素的相对运移,以及围岩中的元素背景值有

关。选用 2 号矿体的 4 个中段的采样数据为分析基础,分别求出衬度值(元素异常平均含量/元素背景值)和异常宽度,采用衬度与异常宽度的乘积作为原生晕横向分带排序的定量指标。该乘积值越大表明其异常规模越大。通过计算得出 4 个近于一致的矿体原生晕横向分带序列(表 2)。排在序列前面的 Cd、Pb、Zn、Sb、Ag 等 5 种元素,在横向上异常强度较大,自矿化中心向外运移距离较远,可作为远矿指示元素;As、Bi、Mo、W 等种元素排在序列的后端,表明它们自矿化中心向外运移距离近,异常强度较弱,可作为近矿指示元素。这与上面定性分析基本是一致的。

### 3.3 矿床原生晕轴向分带

原生晕轴向分带反映出了含矿溶液的运动方向,其分带序列的研究对于判定矿体的剥蚀程度及深部盲矿体的追踪有着极其重要的意义。

**3.3.1 Grigorian 分带指数法的基本原理** 以元素异常的线金属量值为基础,首先将所有元素的最大值处于同一数量级内,即进行线金属量的标准化;然后进行分带指数计算。每一元素的分带指数最大值所在的标高,即为该元素在分带序列中的位置。由此可大致的确定轴(垂)向分带的初步序列。当同一标高上可能存在多个元素的分带指数最大值时,各元素在分带序列中更确切的位置由变异性指数( $G$ )及变异性指数的梯度差( $\Delta G$ )来确定(Beus and Grigorian, 1977)。

(1)变异性指数( $G$ )的公式表达如下:

$$G = \sum_{i=1}^n \frac{D_{\max}}{D_i}$$

其中  $D_{\max}$  为某元素的分带指数最大值;  $D_i$  为某元素在  $i$  中段的分带指数值(不含  $D_{\max}$  所在的中段);  $n$  为中段数(不含  $D_{\max}$  所在的中段)。

(2)变异性指数梯度差  $\Delta G = G_{\pm} - G_{\mp}$  (或  $G_{\mp} - G_{\pm}$ ),  $G_{\pm}$  为  $D_{\max}$  所在中段以上的变异性指数值;  $G_{\mp}$  为  $D_{\max}$  所在中段以下的变异性指数值。

**3.2.2 轴向分带序列的确定** 以各元素大于异常下限( $Ca$ )的数据为研究对象,求出异常范围内的平均值,再通过异常元素平均值来求异常元素线金属量,以各钻孔的异常平均值乘以各钻孔异常的控制距离得到线金属量,然后进行成晕元素线金属量标准化,以标准化后某元素的线金属量与其所在截面标准化后的各元素的线金属量之和的比值来计算分带指数(表 3)。依据元素分带指数最大值所在截面位置由浅至深将所研究元素顺序排列,依据表中的分

表 1 成晕元素浓度分带参数(10<sup>-6</sup>)

Table 1 Zoning parameters of halo-forming elements (10<sup>-6</sup>)

参数	Ag	As	Bi	Cd	Cu	Hg	In	Mo	Pb	Sb	Sn	W	Zn
$\bar{X}$	2.44	50.03	0.18	0.74	6.35	0.06	0.07	0.47	92.89	19.83	2.79	1.84	171.00
S	1.38	24.87	0.02	0.50	1.61	0.03	0.03	0.10	72.78	5.70	1.38	0.66	101.50
Ca	5.19	99.77	0.23	1.74	9.57	0.13	0.12	0.66	238.45	31.22	5.54	3.16	373.58
2Ca	10.38	199.53	0.45	3.49	19.15	0.25	0.24	1.32	476.91	62.45	11.09	6.31	747.17
4Ca	20.76	399.07	0.91	6.98	38.29	0.51	0.48	2.64	953.82	124.90	22.17	12.63	1494.34

注: $\bar{X}$ 为平均值;S为标准偏差;Ca为异常下限.

表 2 原生晕横向(水平)分带序列

Table 2 Horizontal zoning sequence of primary halo

中段	参数	Ag	As	Bi	Cd	Cu	Hg	In	Mo	Pb	Sb	Sn	W	Zn
941 m	K	34.9	11.0	1.7	139.5	57.7	35.8	75.4	3.2	184.8	249.3	22.6	3.4	70.8
	L(m)	62.0	59.1	45.0	62.0	62.0	58.7	62.0	34.0	62.0	62.0	62.0	28.2	62.0
	K·L	2 164	650	78	8 649	3 580	2 104	4 676	108	11 460	15 459	1 401	97	4 390
	序列	Sb-Pb-Cd-In-Zn-Cu-Ag-Hg-Sn-As-Mo-W-Bi												
922 m	K	28.6	9.7	1.8	164.8	31.3	40.8	103.4	3.3	137.8	119.5	19.6	4.6	87.4
	L(m)	71.6	49.2	42.3	69.8	70.1	65.0	53.8	50.9	70.2	71.6	62.3	7.6	69.8
	K·L	2 048	479	74	11 506	2 192	2 651	5 561	167	9 674	8 558	1 222	35	6 103
	序列	Cd-Pb-Sb-Zn-In-Hg-Cu-Ag-Sn-As-Mo-Bi-W												
893 m	K	42.3	10.4	2.2	384.1	62.4	67.5	132.1	3.3	188.3	229.3	32.8	3.6	190.8
	L(m)	70.0	63.5	29.7	70.0	63.3	69.7	61.6	55.0	70.0	70.0	67.2	32.5	69.9
	K·L	2 961	660	66	26 889	3 950	4 704	8 137	180	13 183	16 053	2 206	116	13 328
	序列	Cd-Sb-Zn-Pb-In-Hg-Cu-Ag-Sn-As-Mo-W-Bi												
863 m	K	49.1	23.4	1.6	192.8	18.1	22.5	52.9	3.7	157.9	33.4	23.1	5.4	92.2
	L(m)	66.8	52.5	51.2	71.8	61.2	64.0	42.5	55.9	74.0	68.1	46.5	52.8	71.7
	K·L	3 282	1 225	84	13 850	1 109	1 439	2 250	205	11 693	2 272	1 075	284	6 605
	序列	Cd-Pb-Zn-Ag-Sb-In-Hg-As-Cu-Sn-W-Mo-Bi												

注:K为衬度;L(m)为原生晕异常宽度.

表 3 成矿成晕元素分带指数

Table 3 Zoning indexes of primary halos

元素	标准化系数	标准化后线金属量(10 <sup>-6</sup> ·m)				分带指数			
		ZK85	ZK76	ZK92	ZK168	ZK85	ZK76	ZK92	ZK168
Pb	1	1 800 060	1 025 376	702 015.6	675 115.7	0.056	0.044	0.024	0.027
Zn	1	4 738 864	3 672 371	2 713 206	1 481 712	0.149	0.158	0.092	0.059
Ag	100	1 296 589	756 836	1 027 437	803 266.9	0.041	0.032	0.035	0.032
W	1 000	614 942.4	1 074 300	1 110 918	1 818 394	0.019	0.046	0.037	0.072
Hg	10 000	4 622 029	3 406 307	3 730 604	1 293 826	0.145	0.146	0.126	0.051
Cd	100	4 090 871	2 937 629	2 414 966	1 297 385	0.128	0.126	0.082	0.051
Sb	10	1 728 212	356 212.6	456 794.4	351 173.5	0.054	0.015	0.015	0.014
Sn	100	1 199 524	412 991.4	823 669.4	1 050 914	0.038	0.018	0.028	0.042
Bi	10 000	492 816.7	2 288 785	5 602 307	4 265 967	0.015	0.098	0.189	0.169
In	1 000	831 677	597 779.5	1 405 339	457 307.2	0.026	0.026	0.047	0.018
As	10	2 443 471	1 280 166	4 531 882	3 405 573	0.077	0.055	0.153	0.135
Mo	10 000	6 968 969	3 929 918	3 510 211	7 142 577	0.219	0.169	0.118	0.283
Cu	100	1 042 661	1 559 312	1 600 606	1 183 014	0.033	0.067	0.054	0.047
$\Sigma$		31 870 686	23 297 985	29 629 956	25 226 225				

带指数初步排出分带序列(由浅至深)为:(Pb-Ag-Cd-Sb)-(Zn-Hg-Cu)-(Bi-In-As)-(W-Sn-Mo).

根据变异性指数(G)和变异性梯度差( $\Delta G$ )原

理对在同一中段的矿床指示元素的先后顺序进行确切排序:

(1)对于分带指数最大值位于最上截面的元素

(Pb、Ag、Cd、Sb)运用变异性指数( $G$ )进行计算:

$G_{Pb} = 5.68, G_{Ag} = 3.73, G_{Cd} = 5.09, G_{Sb} = 11.06.$

当分带指数最大值同时位于剖面最上截面时, $G$ 值大的排在相对较高位置,所以上述 4 个元素由浅及深的排序为:Sb-Pb-Cd-Ag.

(2)对于分带指数最大值位于最下截面的元素(W、Sn、Mo)运用变异性指数计算如下:

$G_W = 7.30, G_{Sn} = 4.94, G_{Mo} = 5.37.$

当分带指数最大值同时位于剖面最下截面时, $G$ 值大的排在相对较低的位置,所以上述元素由浅及深的排序为:Sn-Mo-W.

(3)对于分带指数最大值位于中上截面的元素(Zn、Hg、Cu)运用变异性梯度差( $\Delta G = \Delta G_{\text{上}} - \Delta G_{\text{下}}$ )计算如下:

$\Delta G_{Zn} = -3.33, \Delta G_{Hg} = -3.01, \Delta G_{Cu} = -0.64.$

当运用变异性梯度差 $\Delta G = \Delta G_{\text{上}} - \Delta G_{\text{下}}$ 对分带指数最大值在同一中部截面的元素计算时, $\Delta G$ 越大的元素,越应排在分带序列较低的位置,所以对于上述元素由浅及深的排序为:Zn-Hg-Cu.

(4)对于分带指数最大值位于中下截面的元素(Bi、In、As)运用变异性梯度差( $\Delta G$ )计算如下:

$\Delta G_{Bi} = 13.41, \Delta G_{In} = 1.00, \Delta G_{As} = 3.64.$

当运用变异性梯度差 $\Delta G = \Delta G_{\text{上}} - \Delta G_{\text{下}}$ 对分带指数最大值在同一中部截面的元素计算时, $\Delta G$ 越大的元素,应排在分带序列较低的位置,所以对于上述元素由浅及深的排序为:In-As-Bi.

通过上述 4 个截面分带指数的变异性指数和变异性梯度差的计算,得出敖包特铅锌矿区 05 勘探线成矿成晕元素的确切轴向分带序列由浅至深为:Sb-Pb-Cd-Ag-Zn-Hg-Cu-In-As-Bi-Sn-Mo-W.

**3.3.3 原生晕分带序列的解释** 根据上述矿体中发育金属矿物种类,结合因子分析获取的 3 个元素共生组合( $F_1$ : Pb-Zn-Ag-Hg-Cd-Cu-Sb-Sn-In;  $F_2$ : Bi-Sn-In;  $F_3$ : W-Mo-As),将矿体轴向分带序列(Sb-Pb-Cd-Ag-Zn-Hg-Cu-In-As-Bi-Sn-Mo-W)与 Beus and Grigorian(1977)总结的多金属矿床标准轴向分带序列[(Sb, As<sub>1</sub>, Hg)-Cd-Ag-Pb-Zn-Cu-Bi-Mo-Sn-As<sub>2</sub>-W]对比分析可知,二者基本上是一致的.不同之处在于:(1)As 在研究序列中只有一个位置,且排在 Bi-Sn-Mo-W 典型高温组合元素的前面,与排在前面的 Cu 相隔一个元素 In,表明 As 可能主要以砷黝铜矿的形式存在;(2)Hg 元素在研究序列中排在 Pb-Zn-Ag 组合之后,相对标准序列具有明显的

后移.在 05 勘探线成矿成晕元素浓度分带图上(图 4),Hg 异常却在矿体头部发育,但相对异常强度低于成矿元素 Pb、Zn 和 Ag 所致.研究序列中的成矿元素 Pb、Zn 分别赋存于方铅矿、闪锌矿中,Ag 和 Sb 赋存在深红银矿中,Cd 和 In 通常赋存在闪锌矿中,Cu 赋存在黄铜矿和银黝铜矿中,W-Mo-As 可能赋存在高温热液形成的毒砂矿物中.

总之,该原生晕轴向分带序列与标准分带序列基本一致,较客观地反映出各元素在矿体中相对浓集的位置,并与具体矿石矿物在矿体中的富集部位相对应,因此对深部矿体资源潜力评价具有指示作用.

## 4 矿体深部预测模型

以元素分带指数值为基础,依据前缘晕元素组合的诸元素分带指数累乘值与尾晕元素组合诸元素分带指数累乘值之比,能够有效构建深部矿体资源潜力定量评价模型(Beus and Grigorian, 1977).

本次研究选取 $(Sb \times Pb \times Cd \times Ag)_D / (As \times Sn \times Mo \times W)_D$ 作为构建深部矿体定量评价模型的指标.该指标自矿脉的头部至尾部(从浅部至深部)急剧降低:矿体头部(850 m 标高)1.30→矿体中上部(775 m 标高)0.35→矿体中下部(645 m 标高)0.056→矿体尾部(550 m 标高)0.005(图 5).这表明该指标随矿体深度的增加急剧降低,是预测深部矿体资源潜力的有效指标.

对标高( $y$ )与元素指数累乘比值的的关系,按照最小二乘法分别进行一次直线拟合,得出一次拟合直线函数为: $y = 829.2 + 55.7t, t = \ln[(Sb \times Pb \times Cd \times Ag)_D / (As \times Sn \times Mo \times W)_D]$ ,其相关系数  $R^2 = 0.986$ .这表明异常中心位置(标高)与元素指数累乘比值之间具有线性关系.因此,一次直线拟合函数能够有效地预测深部矿体的资源潜力.但如果该指标随深度有规律的降低之后,在某一深部突然升高,则表明矿体的歼灭再现,即深部将发现新的矿体(Chen and Zhao, 1998; Chen *et al.*, 2008).这是因为这种指标突然升高,是深部矿体前缘晕叠加其上部矿体的尾晕所致(Li *et al.*, 1995a, 1995b; 李惠等, 1999; 贺振和张学仁, 2006; 孙华山等, 2008).

## 5 结论

(1)矿体原生晕发育,且分带明显.根据横向分

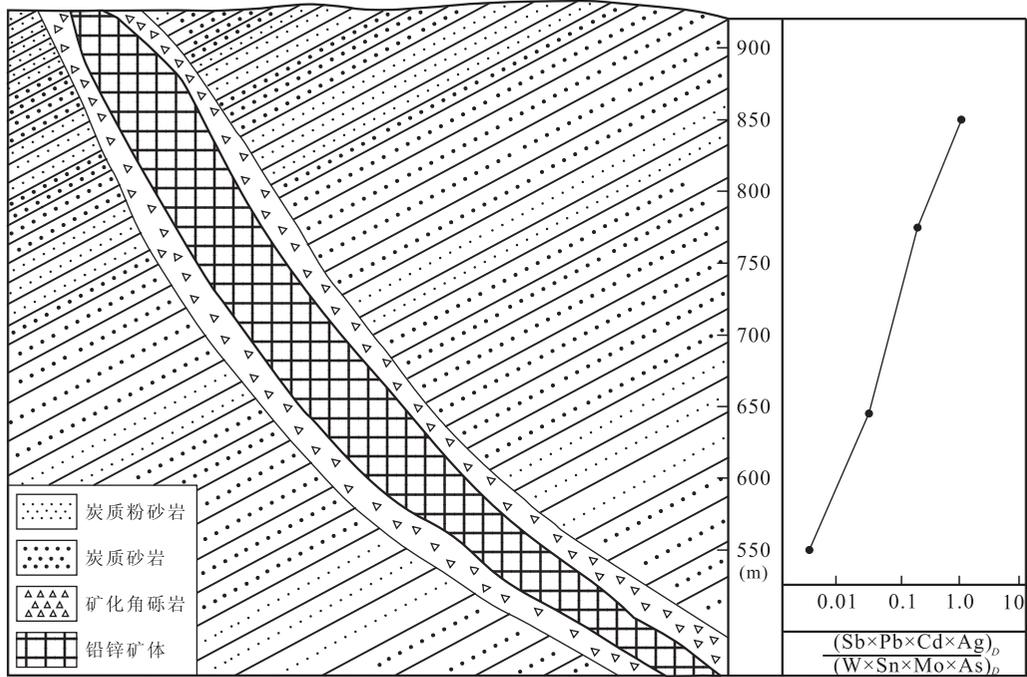


图 5 花敖包特铅锌银矿床深部矿体地球化学预测模型

Fig. 5 Geochemical prospecting pattern for ore bodies in depth within the Huaaobaote Pb-Zn-Ag mine district

带建立成矿成晕元素异常强度的顺序(从强到弱)为: Cd→Pb→Zn→Ag→Sb→In→Hg→As→Cu→Sn→W→Mo→Bi。(2)根据 Beus and Grigorian (1977)原生晕分带计算方法,获得花敖包特铅锌银矿床原生晕的轴向分带序列为: Sb→Pb→Cd→Ag→Zn→Hg→Cu→In→As→Bi→Sn→Mo→W,与(Beus and Grigorian, 1977)建立热液矿床标准分带基本一致。(3)构建了深部矿体预测模型,其预测评价指标  $(Sb \times Pb \times Cd \times Ag)_D / (As \times Sn \times Mo \times W)_D$  在矿体头部为 1.30,矿体中上部为 0.35,矿体中下部为 0.056,矿体尾部为 0.005;这表明该指标随深度的增加有规律地降低,是预测深部矿体资源潜力的有效指标。

致谢:研究工作得到内蒙古玉龙矿业股份有限公司董事长王文龙高级工程师以及丁海军高级工程师、张凤林高级工程师、花敖包特矿山刘召高级工程师、公司技术顾问付高级工程师,以及中国地质大学(武汉)陈守余教授的指导和帮助;中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所岩矿测试分析实验室完成对研究所需的样品测试工作,在此深表感谢!

## References

- Beaudoin, A., Perrault, G., Bouchard, M., 1987. Distribution of gold, arsenic, antimony and tungsten around the Dest-or orebody, Noranda district, Abitibi, Quebec. *Journal of Geochemical Exploration*, 28(1-3): 41-70. doi: 10.1016/0375-6742(87)90039-2
- Beus, A. A., Grigorian, S. V., 1977. Geochemical exploration methods for mineral deposits. Applied Publishing Ltd., Wilmette Illinois, U. S. A., 287.
- Chen, H. W., 2007. Ore-forming characters and prospecting orientation of copper-polymetal deposits in the middle and south sections of Dahinggan Mountains (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Chen, W., Li, Y. X., Wang, S., et al., 2008. Geological and mineralizing fluid's characters of Hua'aobaote silver-polymetallic ore deposit. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 60(5): 32-36, 50 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. Q., Zhao, P. D., 1998. Zonation in primary halos and geochemical prospecting pattern for the Guilaizhuang gold deposit, eastern China. *Natural Resources Research*, 7(1): 37-44. doi: 10.1007/BF02782507
- Chen, Y. Q., Huang, J. N., Liang, Z., 2008. Geochemical characteristics and zonation of primary halos of Pulang porphyry copper deposit, northwestern Yunnan Province, southwestern China. *Journal of China University of Geosciences*, 19(4): 371-377. doi: 10.1016/S1002-0705(08)60070-9
- Clark, L. A., 1987. Near-surface lithogeochemical halo as an

- aid to discovery of deeply buried unconformity-type uranium deposits, Athabasca basin, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*, 28 (1-3): 71-84. doi: 10.1016/0375-6742(87)90040-9
- Dai, X. W., Yang, J. M., Zhang, C. Y., et al., 2000. The application of primary haloes of the ore deposit to the prognosis of deep concealed ore-bodies-exemplified by the Bushang gold deposit in Shandong Province. *Mineral Deposits*, 19 (3): 245-256 (in Chinese with English abstract).
- Ghavami-Riabi, R., Theart, H. F. J., Jager, C. D., 2008. Detection of concealed Cu-Zn massive sulfide mineralization below eolian sand and a calcrete cover in the eastern part of the Namaqua metamorphic province, South Africa. *Journal of Geochemical Exploration*, 97: 83-101. doi: 10.1016/j.gexplo.2007.11.003
- He, Z., Zhang, X. R., 2006. Ore-controlling features and deep-seated metallogenic prognosis of Yinggezhuang gold belt, Shandong Province. *Mineral Deposits*, 25(2): 175-182 (in Chinese with English abstract).
- Konstantinov, M. M., Strujkov, S. F., 1995. Application of indicator halos (signs of ore remobilization) in exploration for blind gold and silver deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 54(1): 1-17. doi: 10.1016/0375-6742(95)00003-8
- Li, H., Wang, Z. N., Li, F. G., 1995a. Ideal models of superimposed primary halos in hydrothermal gold deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 55(1-3): 329-336. doi: 10.1016/0375-6742(94)00063-8
- Li, H., Yu, B., Li, D. L., et al., 2010a. Summary of new methods on deep prediction of geochemical exploration. *Mineral Exploration*, 1(2): 156-160 (in Chinese with English abstract).
- Li, H., Zhang, G. Y., Yu, B., et al., 2010b. Structural superimposed halos method for prospecting blind ore-body in the deep of ore-districts. *Earth Science Frontiers*, 17 (1): 287-293 (in Chinese with English abstract).
- Li, H., Zhang, W. H., Liu, B. L., et al., 1999. The study on axial zonality sequence of primary halo and some criteria for the application of this sequence for major types of gold deposits in China. *Geology and Prospecting*, 35 (1): 32-35 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. G., Cheng, H. X., Yu, X. D., et al., 1995b. Geochemical exploration for concealed nickel-copper deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 55(1-3): 309-320. doi: 10.1016/0375-6742(94)00065-4
- Li, Z. X., Xie, Z. Y., Liu, Z., et al., 2008. Geology and genesis of the Huaobaote lead-zinc deposit in Inner Mongolia. *Geology and Resources*, 17(4): 277, 278-281 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X., Zhuo, F. H., Cui, D., et al., 2009. Geology and genesis of the Daolundaba copper-polymetal deposit in Inner Mongolia. *Geology and Resources*, 18(1): 27-30 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. M., 2006. Progress in studies on primary halos of ore deposit. *Acta Geological Sinica*, 80(10): 1528-1538 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. M., Peng, S. L., 2003. Prediction of hidden ore bodies by synthesis of geological, geophysical and geochemical information based on dynamic model in Fenghuangshan ore field, Tongling district, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 81(1-3): 81-98. doi: 10.1016/j.gexplo.2003.08.004
- Nie, L. S., Cheng, Z. Z., Wang, X. Q., et al., 2007. Comparative study of deep-penetrating geochemical methods: a case study of the Hua'obote lead-zinc deposits, Inner Mongolia, China. *Geological Bulletin of China*, 26 (12): 1574-1578 (in Chinese with English abstract).
- Niu, S. Y., Sun, A. Q., Guo, L. J., et al., 2008. Ore-control structures and prospecting for the Baiyinnuoer Pb-Zn deposit in the Dahinggan range. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(1): 72-80 (in Chinese with English abstract).
- Pan, X. F., Wang, S., Hou, Z. Q., et al., 2009. Geology and metallogenesis of daolundaba copper polymetallic deposits, Inner Mongolia. *Geotectonica et Metallogenia*, 33 (3): 402-410 (in Chinese with English abstract).
- Shao, Y., 1997. Litho-geochemical (primary halos) methods for hydrothermal mineral deposits. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Shao, J. A., Zhang, L. Q., Mu, B. L., et al., 2007. Upwelling of Dahinggan Mountains and its geodynamic background. Geological Publishing House, Beijing, 250 (in Chinese).
- Shipulin, F. K., Genkin, A. D., Distler, V. V., et al., 1973. Some aspects of the problem of geochemical methods of prospecting for concealed mineralization. *Journal of Geochemical Exploration*, 2(3): 193-235. doi: 10.1016/0375-6742(73)90001-0
- Sillitoe, R. H., 2010. The challenge of finding new mineral resources: an introduction. In: Goldfarb, R. J., Marsh, E. E., Monecke, T., eds., The challenge of finding new mineral resources: global metallogeny, innovative exploration, and new discoveries. Society of Economic Geologists, Inc. .
- Sun, H. S., Sun, L., Cao, X. Z., et al., 2008. Axial/vertical zoning characteristics of primary halos and geochemical

- exploration indicators for deep ore body prognosis in Shangzhuang gold deposit, Northwest Jiaodong peninsula, Shandong Province. *Mineral Deposits*, 27(1): 64—70 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. B., Wang, Y. W., Wang, L. J., 2000. Copper metallogenic setting and prospecting potential in the middle-southern part of Dahinggan Mountains. *Geology and Prospecting*, 36(5): 1—4 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, W. D., Hu, S. K., Yan, H. Q., et al., 1998. Main characteristics of Ag-Pb-Zn deposits and discussion on their mineralization on the western slope of the great Hinggan mountains, NE China and neighboring area. *Uranium Geology*, 14(6): 344—351 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. Q., Bao, X. W., 1990. A Study on the petrology, geochemistry and genesis of the Bayannur intermediate-acidic volcano-plutonic complex in eastern Inner Mongolia. *Geological Review*, 36(4): 289—297 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. Q., Lei, Y. F., Luo, T. Y., et al., 1991. Geological characteristics and metallogeny of the Baiyinnuo lead-zinc deposit, Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 10(3): 204—216 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., 2007. Quantitative mineral prediction and deep mineral exploration. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., 1989. Geochemical exploration for deeply hidden ore in southeastern Hubei Province. *Journal of Geochemical Exploration*, 33(1—3): 135—144. doi: 10.1016/0375-6742(89)90024-1
- Zhou, Z. H., Feng, J. R., Lü, L. S., et al., 2010. Ore-forming mechanism and the temporal and spatial structure of the Huanggangliang-Wulanhaote tin-lead-zinc-copper-poly-metallic metallogenic belt, Inner Mongolia. *China Mining Magazine*, 19(6): 100—104 (in Chinese with English abstract).
- 预测. 矿床地质, 25(2): 175—182.
- 李惠, 禹斌, 李德亮, 等, 2010a. 化探深部预测新方法综述. 矿产勘查, 1(2): 156—160.
- 李惠, 张国义, 禹斌, 等, 2010b. 构造叠加晕找盲矿法及其在矿山深部找矿效果. 地学前缘, 17(1): 287—293.
- 李惠, 张文华, 刘宝林, 等, 1999. 中国主要类型金矿床的原生晕轴向分带序列研究及其应用准则. 地质与勘探, 35(1): 32—35.
- 李振祥, 谢振玉, 刘召, 等, 2008. 内蒙古西乌珠穆沁旗花敖包特银铅锌矿床地质特征及成因初探. 地质与资源, 17(4): 277, 278—281.
- 李振祥, 周福华, 崔栋, 等, 2009. 内蒙古道伦达坝铜多金属矿床地质特征及成因初探. 地质与资源, 18(1): 27—30.
- 刘崇民, 2006. 金属矿床原生晕研究进展. 地质学报, 80(10): 1528—1538.
- 聂兰仕, 程志中, 王学求, 等, 2007. 深穿透地球化学方法对比研究——以内蒙古花敖包特银铅锌矿为例. 地质通报, 26(12): 1574—1578.
- 牛树银, 孙爱群, 郭利军, 等, 2008. 大兴安岭白音诺尔铅锌矿控矿构造研究与找矿预测. 大地构造与成矿学, 32(1): 72—80.
- 潘小菲, 王硕, 侯增谦, 等, 2009. 内蒙古道伦达坝铜多金属矿床特征研究. 大地构造与成矿学, 33(3): 402—410.
- 邵跃, 1997. 热液矿床岩石测量(原生晕法)找矿. 北京: 地质出版社.
- 邵济安, 张履桥, 牟保磊, 等, 2007. 大兴安岭的隆起与地球动力学背景. 北京: 地质出版社, 250.
- 孙华山, 孙玲, 曹新志, 等, 2008. 胶西北上庄金矿床原生晕轴(垂)向分带特征及深部矿体预测的勘查地球化学标志. 矿床地质, 27(1): 64—70.
- 王京彬, 王玉往, 王莉娟, 2000. 大兴安岭中南段铜矿成矿背景及找矿潜力. 地质与勘探, 36(5): 1—4.
- 向伟东, 胡绍康, 阎鸿铨, 等, 1998. 大兴安岭西坡及邻区银铅锌矿床成矿作用若干问题的讨论. 铀矿地质, 14(6): 344—351.
- 张德全, 鲍修文, 1990. 内蒙古白音诺中酸性火山—深成杂岩体的岩石学、地球化学与成因研究. 地质论评, 36(4): 289—297.
- 张德全, 雷蕴芬, 罗太阳, 等, 1991. 内蒙古白音诺铅锌矿床地质特征及成矿作用. 矿床地质, 10(3): 204—216.
- 赵鹏大, 2007. 成矿定量预测与深部找矿. 地学前缘, 14(5): 1—10.
- 周振华, 冯佳睿, 吕林素, 等, 2010. 内蒙古黄岗梁—乌兰浩特锡铅锌铜多金属成矿带成矿机制及时空架构. 中国矿业, 19(6): 100—104.

## 附中文参考文献

- 陈宏威, 2007. 大兴安岭中南段铜多金属矿成矿特征与找矿方向(学位论文). 北京: 中国地质大学, 1—63.
- 陈伟, 李应栩, 王硕, 等, 2008. 花敖包特银多金属矿床地质及成矿流体特征. 有色金属, 60(5): 32—36, 50.
- 代西武, 杨建民, 张成玉, 等, 2000. 利用矿床原生晕进行深部隐伏矿体预测——以山东埠上金矿为例. 矿床地质, 19(3): 245—256.
- 贺振, 张学仁, 2006. 山东英格庄金矿床构造控矿特征及深部