



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404684

引用格式:汪栋刚,马学东,马彦云,等.宁夏卫宁北山二人山地区热液型多金属矿找矿多维异常方法的新尝试和效果[J].科学技术与工程,2025,25(16):6652-6663.

Wang Donggang, Ma Xuedong, Ma Yanyun, et al. A new attempt and effect of multidimensional anomaly system for prospecting hydrothermal polymetallic deposits in Errenshan area, Weiningbeishan, Ningxia[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(16): 6652-6663.

# 宁夏卫宁北山二人山地区热液型多金属矿找矿 多维异常方法的新尝试和效果

汪栋刚<sup>1</sup>, 马学东<sup>1\*</sup>, 马彦云<sup>2,3</sup>, 马风华<sup>1</sup>, 陆茂欣<sup>1</sup>, 向连格<sup>1</sup>, 何庆志<sup>1</sup>, 王成<sup>1</sup>

(1. 宁夏回族自治区基础地质调查院, 银川 750021; 2. 宁夏回族自治区地质局, 银川 750021; 3. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074)

**摘要** 宁夏卫宁北山二人山地区位于阿拉善微陆块南缘,是宁夏境内重要的热液成因多金属矿产成矿区之一。为服务该地区下一步在外围及深部的找矿,在钻孔岩石地球化学测量的基础上,对该地区多维异常体系进行探讨。结果表明:在该地区已知多金属矿(化)体中,发育着以常量元素 Na<sub>2</sub>O 为主要特征的负异常体系、以 S 为代表的矿化剂元素异常体系、成矿及其伴生元素异常体系等,证实了多维异常体系的存在,并进一步在多维异常体系理论的指导下圈定了研究区成矿条件和成矿潜力有利区域。研究成果是卫宁北山地区热液型多金属矿找矿优选地球化学勘查方法的新尝试,对该区地质找矿具有重要的实用价值。

**关键词** 热液型多金属矿床; 矿致异常; 多维异常体系; 卫宁北山

**中图分类号** P632; **文献标志码** A

## A New Attempt and Effect of Multidimensional Anomaly System for Prospecting Hydrothermal Polymetallic Deposits in Errenshan Area, Weiningbeishan, Ningxia

WANG Dong-gang<sup>1</sup>, MA Xue-dong<sup>1\*</sup>, MA Yan-yun<sup>2,3</sup>, MA Feng-hua<sup>1</sup>, LU Mao-xin<sup>1</sup>,  
XIANG Lian-ge<sup>1</sup>, HE Qing-zhi<sup>1</sup>, WANG Cheng<sup>1</sup>

(1. Ningxia Institute of Basic Geological Survey, Yinchuan 750021, China; 2. Geological Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750021, China; 3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**[Abstract]** Errenshan area of Weiningbeishan is located in the southern margin of Alashan microcontinent, which is one of the important hydrothermal polymetallic mineralization areas in Ningxia. In order to serve the next prospecting in the periphery and deep part of the area, the multidimensional anomaly system in this area was discussed on the basis of borehole rock geochemical survey. The results show that in the known polymetallic ore bodies in this area, there are negative anomaly systems characterized by major element Na<sub>2</sub>O, mineralization agent element anomaly system represented by S, mineralization and associated element anomaly system, etc., which confirms the existence of multidimensional anomaly system. Under the guidance of the theory of multi-dimensional anomaly system, the metallogenic conditions and favorable areas of metallogenic potential in the study area are further delineated. The research result is a new attempt to optimize geochemical exploration methods for hydrothermal polymetallic deposits in Weiningbeishan area, and has important practical value for geological prospecting in this area.

**[Keywords]** hydrothermal polymetallic deposit; anomaly related to mineralization; multidimensional anomaly system; Weiningbeishan

在热液成矿系统中,由于成矿热液的作用,在成矿地质体—热液体系中将发生元素的活化、迁移和重新分布、分配,为利用地球化学信息指导找矿

提供了前提条件。在此理论上发展兴起的地球化学勘查已成为一项异常进行查证与矿产资源潜力评价的重要手段<sup>[1-3]</sup>。

收稿日期: 2024-06-23; 修订日期: 2025-03-07

基金项目: 宁夏回族自治区自然科学基金(2023AAC03771); 宁夏战略性矿产资源储备调查与评价(DD20190828-05); 中国矿产地志(宁夏)项目(DD20221695, DD20190379, DD20160346)

第一作者: 汪栋刚(1985—),男,汉族,宁夏固原人,硕士,高级工程师。研究方向:区域地质及矿产勘查。E-mail: lim-wdg@foxmail.com。

\* 通信作者: 马学东(1986—),男,汉族,宁夏中卫人,硕士,高级工程师。研究方向:区域地质、矿产勘查及综合地质调查。E-mail: maxuedong@126.com。

近年来,随着深部矿产勘查不断推进,矿化体埋藏深度逐渐加深,地球化学勘查难度也急剧增大。在这种情况下,成矿系统中的多属性地球化学异常作为成矿地质作用在微观地球化学层面的客观反映被人们所逐渐重视,对这些异常的深入认知对勘查地球化学学科发展产生了深远的影响。马生明等<sup>[4-6]</sup>在系统梳理、归纳了内蒙古、甘肃、新疆、长江中下游等 50 多个热液成因多金属矿床的研究基础上,提出了聚焦于成矿系统的热液成因有色金属矿床矿致异常规律——多维异常体系,多维异常体系指产出在特定成矿地质时期地质体中空间有序共存、形成机理各异、成矿指向递进的多属性地球化学异常体系,具体包括元素负异常体系、矿化剂元素异常体系、矿化剂元素与 Fe 和成矿元素间协同平衡体系、成矿及其伴生元素异常体系、惰性元素质量守恒体系等。多维一词既表征特定地质时期形成的矿致异常空间产出状态,又表征矿致异常由多种异常体系构成。异常体系是指每种属性的异常由一系列具有内在联系的单元异常构成,在每种异常体系中出现异常的通常不是某单个元素,而是一系列具有内在联系的多元素。陈宏强等<sup>[7-8]</sup>研究表明,多维异常体系中,负异常体系为矿床的形成提供了有利前提,S 的异常体系是指示成矿的必要条件,也是成矿系统矿化强度的体现。彭芊芃等<sup>[9]</sup>研究发现,斑岩-接触交代复合型有色金属矿在成矿过程中也存在多维异常体系,在矿体深部负异常体系及矿化剂元素正异常体系与成矿元素异常体系套合较好。多维异常体系是从不同侧面系统、全面地剖析成矿地球化学系统中元素地球化学行为和分布分配规律,正是通过探讨元素的富集贫化特征,了解元素的富集、贫化,研究元素富集或贫化与成矿作用的关系,从而更加客观、准确地指导深部矿预测和评价。多维异常体系理论在安徽马头斑岩型铜矿、兆吉口铅锌矿、河北省小寺沟铜矿等多金属矿,以及新疆东准噶尔地区铜矿勘查、内蒙古高石山地区铜多金属矿靶区优选等项目上取得了很好的应用,特别是以多维异常体系为指导,在黑龙江多宝山矿集区铜山铜矿床某钻孔中发现了厚大的锌铅多金属矿化体<sup>[10-11]</sup>。这些成果不仅为应用多维异常体系理论指导深部矿地球化学预测提供了成功案例,也为扩大矿山综合价值提供了重要信息。基于此,以卫宁北山二人山地区实际勘查资料为基础,结合相关试验研究成果,探讨热液型多金属矿的多维异常体系,验证银铅矿成矿系统中是否存在多属性异常,进而为下一步外围及深部找矿突破提供参考。

## 1 研究区地质概况

### 1.1 区域地质背景

研究区位于宁夏西部的卫宁北山地区,是宁夏重要的金属矿产成矿区之一,以铜、金矿化为主,共生或伴生有铅、银、钴、铁矿化,构成一个多矿种、多类型的矿化密集区带,主要矿床(点)有金场子金矿、二人山银铅矿、黄石坡沟金矿、照壁山铁矿、新照壁山铁铜矿、大铜沟铜矿等<sup>[12]</sup>。

大地构造位于阿拉善微陆块南缘,南与北祁连造山带相接,东与鄂尔多斯地块毗邻,属构造活动带与稳定地块交接部位,华力西末期以来,受近南北向的挤压,形成近东西向展布的褶皱、断裂构造,控制了该区的山体形态和地层分布,与成矿作用密切相关,是矿区主要的导矿、容矿构造<sup>[13-15]</sup>。成矿主要与古构造、地层、岩体等有关<sup>[16-22]</sup>。目前已发现的金属矿产主要有铁矿、银铅矿、金(银)矿、铜(金)矿和硫铁矿等。本区矿产大部分与沉积热卤水和岩浆热液有关,主要赋存在近东西向展布的南、北两个成矿带上。北部为照壁山-大铜沟铜金(铁)成矿带;南部为金场子-黄石坡沟-二人山金银铅多金属成矿带<sup>[23]</sup>。

区内出露地层主要有上泥盆统老君山组,下石炭统前黑山组和臭牛沟组,上石炭统土坡组及第四系,主要由砂岩、灰岩、泥岩及页岩组成(图 1)。

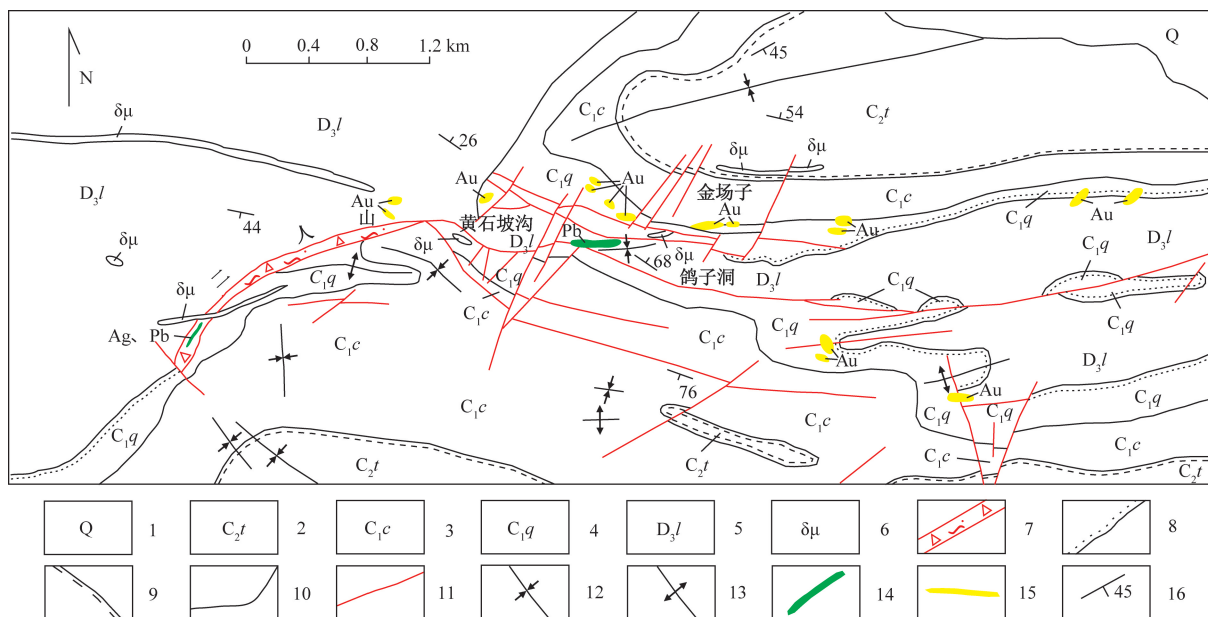
区内地表岩浆岩不发育,以发育少量中酸性岩脉为特征,主要岩性为闪长玢岩,也有少量的辉绿岩脉、石英闪长岩脉、石英闪长玢岩脉分布,常侵入上泥盆统老君山组及下石炭统内的近东西向展布的构造破碎带或层间裂隙中,在地表呈断续分布,走向与主构造线方向基本一致。热液活动较普遍,局部地段见有热液石英脉、方解石脉和重晶石脉出露。地表蚀变强烈,形成一套以绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化和钠长石化为代表的青磐岩化蚀变组合<sup>[23]</sup>。

区内主要褶皱有西部的单梁山背斜和东部的大铜沟向斜。主要断裂为 F18 区域性断裂带,由主裂面和次级层间断裂以及破碎岩带组成,与成矿作用关系密切。

### 1.2 研究区地质概况

二人山工区位于卫宁北山地区西部。区内海拔 1 000 ~ 1500 m,总体地势南高北低。地貌类型以低山丘陵地貌为主。

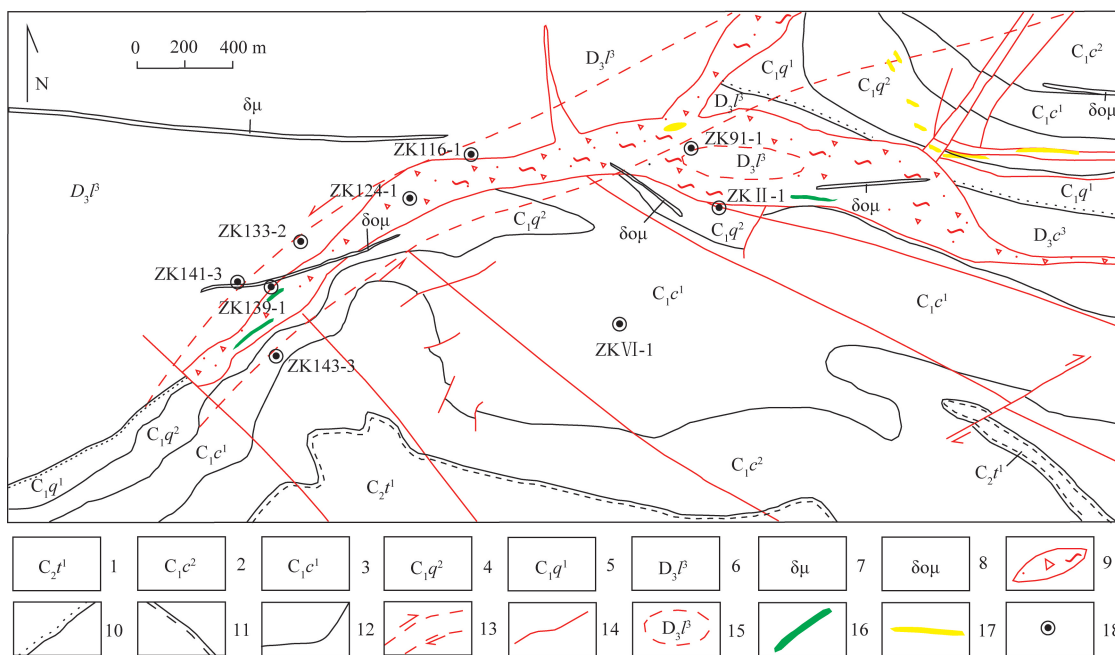
区内出露地层主要有泥盆系上统老君山组三段( $D_3l^3$ )、石炭系下统前黑山组一段( $C_1q^1$ )和二段( $C_1q^2$ )、臭牛沟组一段( $C_1c^1$ )和二段( $C_1c^2$ )、石炭系上统土坡组一段( $C_2t^1$ ),如图 2 所示。老君山组分布在矿区北西方向,主要为粉砂岩、细砂岩,夹砾



1 为第四系;2 为石炭系土坡组;3 为石炭系臭牛沟组;4 为石炭系前黑山组;5 为泥盆系老君山组;6 为闪长玢岩脉;7 为破碎带;8 为角度不整合地质界线;9 为平行不整合地质界线;10 为整合地质界线;11 为断层;12 为向斜;13 为背斜;14 为多金属矿化体;15 为金矿化体;16 为产状

图1 卫宁北山地区区域地质简图

Fig. 1 Regional geological map of Weiningbeishan area



1 为石炭系土坡组一段;2 为石炭系臭牛沟组二段;3 为石炭系臭牛沟组一段;4 为石炭系前黑山组二段;5 为石炭系前黑山组一段;6 为泥盆系老君山组三段;7 为闪长玢岩脉;8 为石英闪长玢岩脉;9 为破碎带;10 为角度不整合地质界线;11 为平行不整合地质界线;12 为整合地质界线;13 为韧性剪切带;14 为断层;15 为断夹体;16 为多金属矿化体;17 为金矿化体;18 为试验钻孔

图2 二人山研究区地质简图

Fig. 2 Geological map of Errenshan research area

岩。臭牛沟组分布在矿区南部,主要为砂岩、页岩,夹少量灰岩。土坡组分布在矿区南部和东北部,主要为砂岩、粉砂岩、泥(页)岩,偶夹泥灰岩。岩浆活动微弱,仅见石英闪长玢岩岩脉,近东西向展布,出露宽度1~5 m,沿走向长约3.3 km。热液活动强

烈,局部地段有热液石英脉、方解石脉及重晶石脉出露。东西向构造带是区内的主体构造,东西向逆冲断层与东西向褶皱构造同期,形成于印支运动。与成矿作用密切相关的断裂构造主要为F18断裂带,位于二人山-黄石坡沟,长度大于3 km,宽10~

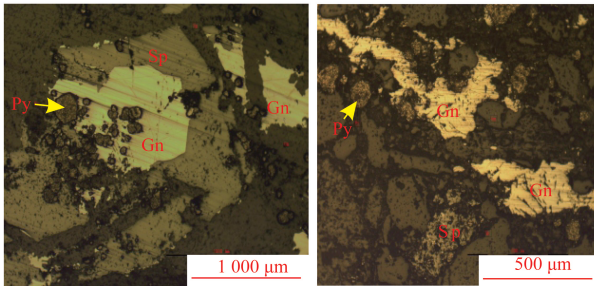
250 m,断面近于直立,向深部延伸大于1 200 m<sup>[17]</sup>。近矿围岩一般为构造角砾岩、碎裂状粉砂岩等。岩层蚀变作用强烈,矿区围岩蚀变主要以黄铁矿化、高岭土化、硅化为主。成矿热液受近东西向构造控制,蚀变岩石多沿构造带及两侧围岩呈带状分布,与围岩呈渐变过度关系。

区内断裂构造发育,矿体主要赋存在F18等蚀变破碎带中,以ZK139-1钻孔附近规模最大,矿体厚51.2 m,向南东尖灭于地表,向西未封闭,垂直深度99~186 m。平均品位Pb为24%,Ag为243 g/t。矿体主要以似层状和透镜状产出,受破碎带控制。

矿石矿物组合以方铅矿、闪锌矿、黄铁矿为主,次为黄铜矿、自然金。次生矿物主要为褐铁矿、黄钾铁矾、孔雀石等。脉石矿物主要为石英、方解石等。硫化矿物一般为半自形~他形粒状结构、交代溶蚀结构等,主要以细脉浸染状、团块状、星点状、角砾状构造产出(图3)。

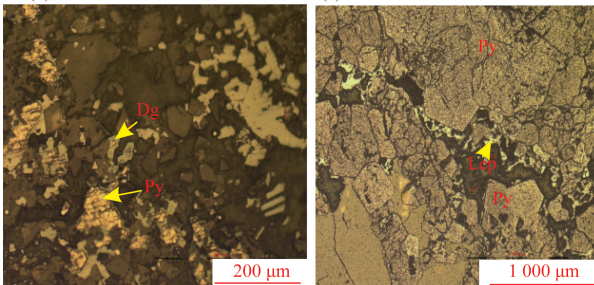


(a) 多金属矿矿石标本



(b) 方铅矿、闪锌矿镜下显微特征

(c) 方铅矿、黄铁矿镜下显微特征



(d) 蓝辉铜矿、黄铁矿镜下显微特征

(e) 褐铁矿、黄铁矿镜下显微特征

Py为黄铁矿;Gn为方铅矿;Sp为闪锌矿;Dg为蓝辉铜矿;Lep为褐铁矿  
图3 矿石标本及镜下显微特征

Fig. 3 Mineral specimens and microscopic features under the microscope

## 2 多维异常体系

研究区多维异常体系研究选择在二人山地区已施工的9个钻孔中进行(图2)。钻孔中采用分层连续捡块的方式进行采样,基本采样间距为10 m,矿化地段根据矿化情况适当加密,间距视具体情况掌握,共采集钻孔样品567件。

### 2.1 地球化学勘查指标

根据多维异常体系研究和应用的需要,兼顾效益和效率等因素,在元素富集贫化特征及规律研究基础上,推荐研究区矿床地球化学勘查指标如表1所示。推荐的指标充分考虑了各项指标异常属性及成矿指示作用,并将指标划分为成矿环境指标、成矿元素、伴生元素、矿化剂元素等。对多金属矿而言,除成矿元素以外,其他必选指标有矿化剂元素S和常量元素 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。 $\text{Na}_2\text{O}$ 是多金属矿床中常见的发生贫化作用的元素,用来指示成矿前提。通常情况下, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 表现出惰性,视 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为惰性元素。

表1 研究区地球化学勘查推荐实验测试指标

Table 1 Recommended experimental testing indicators for geochemical exploration in the research area

指标分类	元素
成矿环境指标	$\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$
成矿元素	Pb、Zn、Cu、Au、Ag、Mo
伴生元素	As、Hg、Cd
矿化剂元素	S

### 2.2 元素异常体系

在研究区开展研究的9个钻孔中,ZK139-1钻孔见矿情况最好。以下即主要以该钻孔为例,研究多属性异常特点,进而探讨成矿过程中可能的元素活动特点及矿化机制。

#### 2.2.1 元素含量分布特征

ZK139-1钻孔深度500 m,出现的岩性依次为粉砂岩、角砾岩、细砂岩、粉砂岩,矿体、矿化体埋深在140~190 m,赋矿围岩为角砾岩。该钻孔中基本采样间距为10 m,矿化地段加密至5 m,共采集样品57件。 $\text{Na}_2\text{O}$ 、S、Pb、Zn、Cu、Ag、TFe元素含量分布如图4所示。钻孔中70 m以浅地段,岩性以粉砂岩为主,其次是细砂岩,但是 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量变化剧烈,其最低含量为0.02%,最高含量4.36%,显著低于或高于中国东部粉砂岩平均化学组成,平均含量1.40%,与中国东部粉砂岩平均化学组成相当。推测该地段岩石经历了强烈的热液活动,导致岩石中最易活动的 $\text{Na}_2\text{O}$ 发生强烈的再分配作用。孔深70~130 m范围内, $\text{Na}_2\text{O}$ 含量都很低,平均含量只

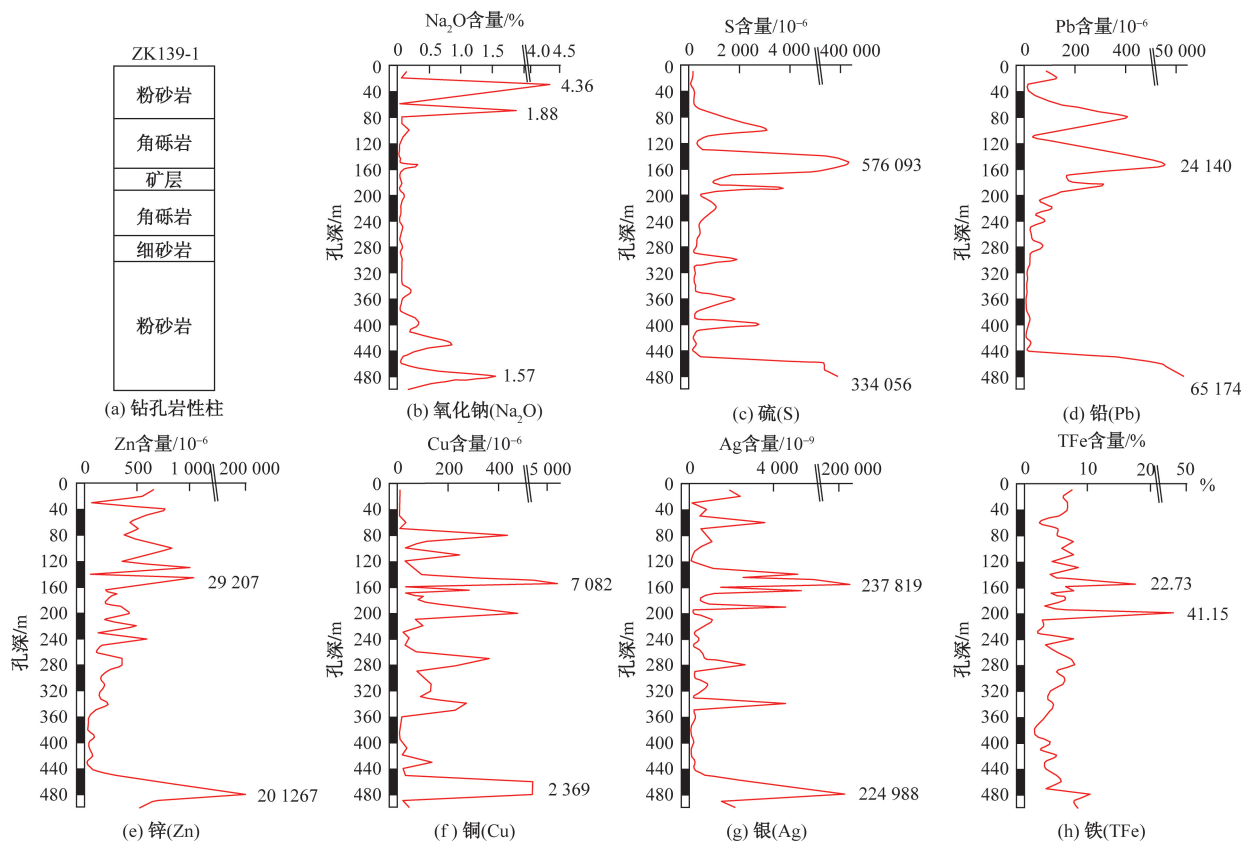


图4 研究区钻孔 ZK139-1 钻孔元素含量分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of element content distribution in drilling ZK139-1 in the research area

有 0.06%, 不到粉砂岩平均化学组成的 1/2, 推测是在热液活动影响下发生了带出作用, 由此出现贫化。这段地层中, 矿化剂元素 S 和成矿元素 Pb、Zn、Ag、Cu 总体上呈现从高到低的规律性变化, 其中 S 的变化规律最明显, 从  $32\ 250 \times 10^{-6}$  降低到  $500 \times 10^{-6}$ , 推测成矿元素 Pb、Zn、Ag、Cu 等的含量变化受到 S 含量变化的影响。孔深 130 ~ 190 m 是矿体或矿化体产出地段。这一深度范围内的角砾岩中, 矿化剂元素 S 含量显著增高, 与之相伴的是成矿元素 Pb、Zn、Ag、Cu 等含量显著增大, 为形成矿体或矿化体提供了有利的物质基础。矿体主要产出在 130 ~ 155 m 的范围内, 结合 ZK139-1 钻孔周围施工钻孔的见矿情况综合分析, 矿体规模不大, 且在 155 m 以下至 190 m 地段只相当于矿化程度。

### 2.2.2 异常及矿化形成机制分析

与热液活动有关的矿床中由元素带出形成的负异常较早就引起研究者的关注<sup>[24-25]</sup>。在矿(化)体产出地段,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量稳定在低含量水平, 表明热液活动仍然存在, 也表明该地段的成矿作用与热液活动有关。如何判断研究区成矿机制, 重点是元素迁移方向及其与成矿的关系。

如前所述, 孔深 70 ~ 130 m 的 60 m 进尺范围

内, 即目前发现矿体的上盘,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量很低, 不足粉砂岩平均化学组成的 1/2, 推测是热液活动的结果。从这一地段矿化剂元素 S 和成矿元素 Pb、Zn、Ag、Cu 的分布特征上看, 从 70 m 深处向下到 130 m 深处, 这些元素也发生了活化迁移, 根据元素的含量变化特征分析, 元素迁移的方向是从浅部向深部, 即从 70 m 深度向下迁移, 并在 130 ~ 190 m, 主体在 130 ~ 155 m 处沉淀, 富集形成矿(化)体。

根据这样的元素迁移机制, 认为研究区多金属矿体或矿化体的形成, 是地层中元素活化迁移再富集的结果。根据目前获得的试验结果, 矿化剂元素和成矿元素活化迁移是与常量元素的活化迁移有关, 直接地球化学信息就是  $\text{Na}_2\text{O}$  的低含量或负异常。据此推测, 只要  $\text{Na}_2\text{O}$  的低含量或负异常存在, 热液活动及由此引发的元素活化迁移就没有结束。

在 ZK139-1 钻孔中, 从 190 m 深度向下一直到 380 m 孔深,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量总体稳定在低含量水平, 含量平均值只有 0.06%, 到 380 ~ 500 m,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量略有升高, 平均含量达到 0.45%。 $\text{Na}_2\text{O}$  的低含量, 表明从 190 m 深度向下钻孔深部热液活动仍然存在, 也就是仍然具备成矿前提。按照多维异常体系理

论,在具备成矿的前提下,要看矿化剂元素 S 的含量状况。在 190 m 深度以下至 450 m,矿化剂元素 S 总体含量水平不高,成矿元素 Pb、Zn、Cu、Ag 等的含量也不高,综合  $\text{Na}_2\text{O}$  的活化迁移现象考虑,这些元素的低含量也可能是由于热液活动使元素发生了活化迁移造成的,深部还应该存在矿化剂元素和成矿元素的富集地段。经过后期测试分析,在孔深 450 ~ 480 m 地段果然存在着这些元素的显著富集,而且仅从元素含量看,Pb、Zn 以及 Cu、Ag 等已经构成矿体,矿化强度和矿体厚度甚至大于上部的已知矿体。未见矿的 ZK II-1(图 5)、ZK VI-1(图 6) 钻孔中  $\text{Na}_2\text{O}$  等元素的负异常情况也是如此,基于此认为研究区目前勘探工程控制地段深部,热液活动不但没有结束,而且还很强,具备形成热液成因矿床的前提条件。

### 2.3 矿化剂元素异常体系

表 2、表 3 及图 4 ~ 图 6 中展示了研究区钻孔中不同类型岩石中主量元素氧化物及微量元素含量平均值统计结果。为了探讨矿化剂元素(S)对矿化的控制及影响,首先以工区内见矿最好的 ZK139-1 钻孔为参照标准进行介绍。

钻孔 ZK139-1 中,多金属矿化赋存的构造角砾岩(原岩主要是碎屑岩)的矿化剂元素 S 含量高

达  $125\ 114 \times 10^{-6}$ ,是该钻孔中 S 含量最高的地段。不仅如此,对比其他 8 个钻孔中 S 含量状况,此钻孔中多金属矿化地段的 S 也是高含量地段之一。据此认为,矿化剂元素 S 对研究区多金属矿化起到了直接的控制作用。ZK139-1 钻孔底部 S 含量状况以及对应的多金属矿化体的发现,也是对这一认识的佐证。

在 ZK139-1 钻孔底部 430 ~ 500 m 深度范围内,岩性主要是粉砂岩,其中 S 平均含量为  $80\ 027 \times 10^{-6}$ ,是该钻孔中 S 的次含量地段,也是 9 个钻孔中 S 的高含量段。尤其是在 460 ~ 500 m 深度范围内, S 平均含量达到  $111\ 900 \times 10^{-6}$ ,与之相对应,多金属成矿元素 Ag、Pb、Zn、Cu 等的平均含量分别是  $75\ 914 \times 10^{-9}$ 、 $23\ 722 \times 10^{-6}$ 、 $59\ 768 \times 10^{-6}$ 、 $1\ 270 \times 10^{-6}$ ,甚至高于已知矿化地段(140 ~ 190 m 范围)的 Ag( $36\ 948 \times 10^{-9}$ )、Pb( $3\ 906 \times 10^{-6}$ )、Zn( $3\ 321 \times 10^{-6}$ )、Cu( $1\ 031 \times 10^{-6}$ )含量。既然矿化剂元素对研究区多金属矿化具有直接的控制作用,那么该地区的找矿方向就应该是地层中 S 含量高的地段。表 3、图 4 ~ 图 6 中列示了研究区 9 个钻孔中分岩性 S 含量统计结果,从中可以看到,9 个钻孔中 S 含量最大的地段主要出现在 ZK139-1 钻孔石炭系前黑山组中。位于 ZK139-1 钻孔南部的 ZK143-3 钻孔,在

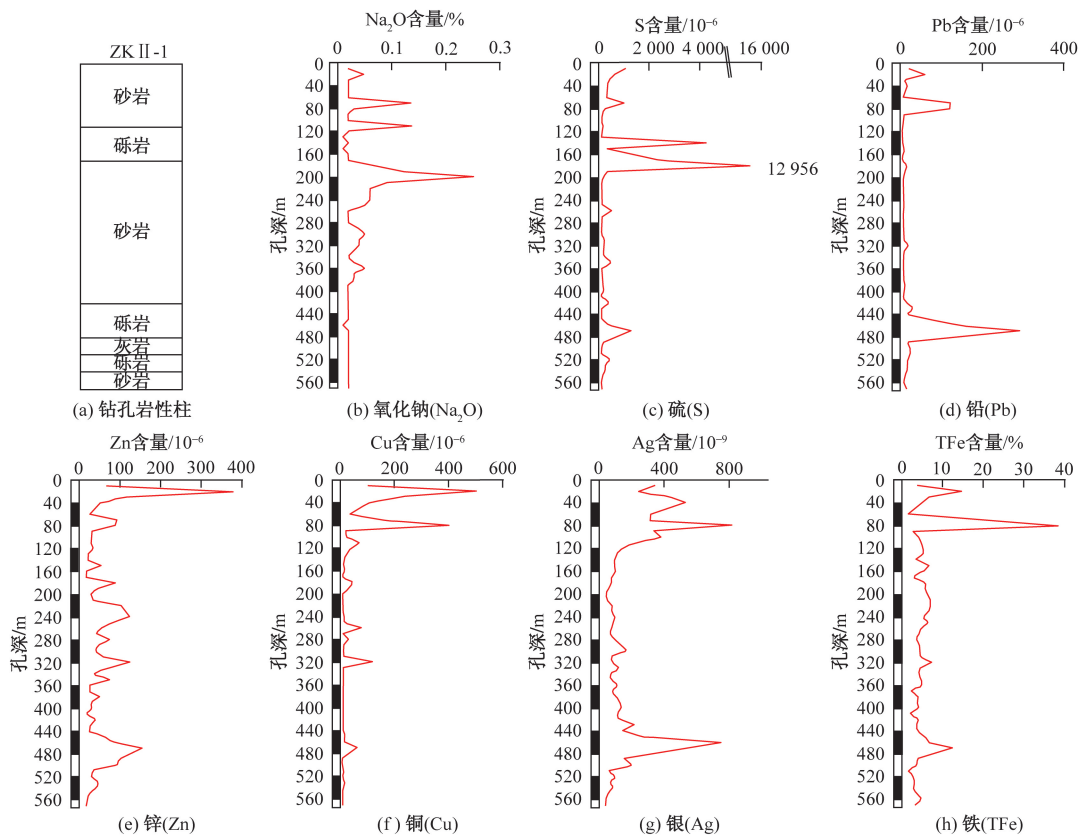


图 5 研究区钻孔 ZK II-1 钻孔元素含量分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of element content distribution in drilling ZK II-1 in the research area

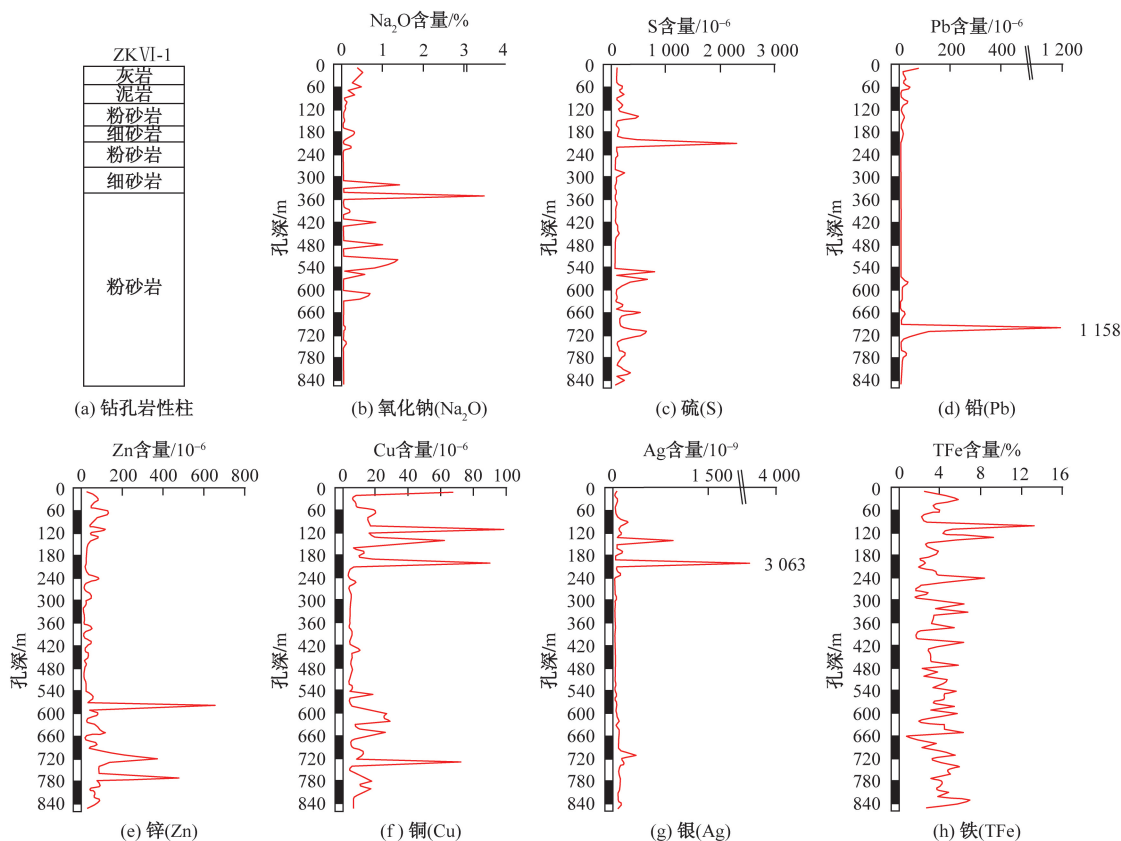


图6 研究区钻孔 ZKVI-1 钻孔元素含量分布示意图

Fig. 6 Schematic diagram of element content distribution in drilling ZKVI-1 in the research area

460 ~ 470 m 深度范围内的角砾岩中, S 含量高达 24%, 同时金属成矿元素 Ag、Cu、Au、Pb 及其伴生元素 As 等也出现了高含量; 位于 ZK139-1 钻孔西部的 ZK141-3 钻孔, 在 260 ~ 270 m 深部范围内的角砾岩中, S 含量为 14%, 同时金属成矿元素 Ag、Pb 及其伴生元素 As 等也出现了高含量, 更进一步证实了矿化剂元素 S 对研究区多金属矿化的控制作用。

除 ZK139-1、ZK143-3、ZK141-3 钻孔以外的其他钻孔中, 尽管有个别的高含量点存在, 但是 S 含量总体都比较低。这些钻孔大部分沿着 F18 韧性剪切带分布在 ZK139-1、ZK143-3、ZK141-3 钻孔东北方向。根据勘探钻孔的分布及其中 S 含量状况推测, 研究区的找矿方向应该是 ZK139-1、ZK143-3、ZK141-3 钻孔连线西南方向。根据目前的勘探资料, 找矿重点目标体是石炭系前黑山组与韧性剪切带耦合地段。

#### 2.4 成矿及其伴生元素异常体系

成矿元素含量状况是决定能否成矿的必要条件, 直接控制着成矿前景和成矿潜力。从各钻孔中成矿元素 Ag、Pb、Zn、Cu 以及 Au 的含量上看, 除已经有矿化显示的 ZK139-1、ZK143-3、ZK141-3 钻孔以外, 其他钻孔中成矿元素含量总体不高, 远达

不到成矿或矿化的程度。而且依据钻孔中成矿元素含量变化分析, 从 ZK139-1、ZK143-3、ZK141-3 钻孔连线向东北以及东、北方向, 钻孔中成矿元素含量通常不高, 而且有降低的趋势。如果仅从成矿元素含量及其变化趋势角度考虑, 在这些方向上进一步找矿潜力不大。但是一个不确定的问题是, 在部分未见明显矿化钻孔的底部,  $\text{Na}_2\text{O}$  的贫化并没有结束, 有些钻孔中  $\text{Na}_2\text{O}$  的贫化程度还很强, 表明这些钻孔还没有控制相应地段的热液活动影响范围。综合这种情况考虑, 在有利成矿条件, 例如石炭系前黑山组中不排除存在矿化体乃至矿体的可能性。在 ZK139-1、ZK143-3、ZK141-3 钻孔连线的西南部, F18 韧性剪切带仍然存在, 表明具备成矿的构造条件以及热液活动条件。从 F18 韧性剪切带的东北部向西南部, 成矿元素的含量变化呈逐渐增加的趋势, 但是由于缺少试验钻孔控制, 成矿元素含量状况尚不明确。根据 F18 韧性剪切带地表发育及产状变化情况分析, 相比东北部而言, 西南部应该是该韧性剪切带的倾末端, 也就意味着东北部地段遭受剥蚀的程度大于西南部。基于此, 认为研究区的西南部地段的成矿潜力值得期待。

表2 研究区钻孔中主量元素氧化物质量分数  
Table 2 The oxide content of major elements in drilling holes in the research area

钻孔编号	深度/m	岩性	样品数	主量元素氧化物质量分数/%						
				Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O
ZK143-3	100	粉砂岩	10	0.88	54.97	15.91	4.69	0.82	7.81	2.55
	460	粉砂岩	35	0.18	43.02	10.66	4.14	1.39	16.57	2.30
	470	角砾岩	2	0.04	16.06	4.36	27.87	4.41	4.18	0.69
	619	角砾岩	30	0.03	31.61	9.59	6.35	6.33	17.39	1.43
ZK141-3	260	粉砂岩	32	0.32	42.67	12.15	6.03	4.12	11.24	3.17
	270	粉砂岩	1	0.03	33.60	9.89	18.40	4.80	6.93	2.23
	430	粉砂岩	16	0.19	44.67	11.98	5.26	4.42	10.98	2.71
ZK133-2	30	粉砂岩	4	0.95	46.84	11.62	5.92	2.50	10.59	1.60
	210	粉砂岩	18	0.20	44.60	11.83	5.55	3.61	9.74	2.79
	218	闪长玢岩	1	0.02	48.73	16.08	3.00	2.05	9.90	2.47
	250	粉砂岩	3	0.02	41.31	12.71	5.25	3.50	13.77	2.70
	280	角砾岩	5	0.02	42.67	12.23	5.84	3.12	9.78	3.04
	290	泥岩	2	0.02	37.90	10.82	5.09	2.32	6.27	2.53
	305	角砾岩	2	0.02	39.09	10.94	11.20	3.57	12.96	3.23
	380	粉砂岩	8	0.02	49.28	12.96	7.12	3.18	6.91	3.23
	410	中砂岩	3	0.02	65.65	14.01	4.76	1.14	1.48	2.73
	435	粉砂岩	3	0.02	60.74	13.43	9.54	0.99	1.56	2.98
	440	矿化层	1	0.02	53.73	18.44	13.19	0.41	0.20	3.83
	520	细砂岩	9	0.45	59.38	14.75	5.14	1.47	3.13	3.17
ZK124-1	50	角砾岩	5	0.06	35.22	6.95	18.45	1.74	13.77	1.66
	120	粉砂岩	7	0.04	48.26	11.51	4.46	2.68	11.77	3.22
	140	角砾岩	2	0.02	15.02	4.07	14.49	15.38	23.17	0.83
	200	粉砂岩	6	0.03	38.00	10.71	6.57	2.85	17.59	2.87
	210	角砾岩	1	0.02	16.47	5.95	22.43	0.57	25.73	1.44
	250	细砂岩	4	0.04	45.95	7.64	3.03	2.39	16.46	2.16
	290	角砾岩	4	0.03	41.94	6.23	9.99	3.28	15.64	1.31
	310	闪长玢岩	2	0.02	26.32	9.78	2.86	0.46	29.65	1.47
	410	角砾岩	10	0.02	23.78	11.38	6.83	8.30	22.00	0.06
	460	细砂岩	5	0.02	52.15	10.76	3.52	0.95	11.80	1.02
ZK116-1	120	粉砂岩	12	0.06	47.07	11.97	6.00	3.31	6.93	2.60
	240	角砾岩	12	0.02	18.92	5.13	5.27	3.47	30.40	0.64
	290	细砂岩	5	0.02	5.06	0.86	1.70	0.18	49.28	0.11
	430	角砾岩	14	0.04	32.52	5.74	6.83	0.36	24.23	1.28
	450	闪长玢岩	2	0.03	58.88	13.03	5.28	0.37	4.70	3.11
	550	角砾岩	10	0.16	47.13	15.63	8.93	2.66	6.27	3.41
	640	细砂岩	5	0.06	43.82	10.13	6.71	3.74	11.90	2.23
ZK91-1	20	粉砂岩	2	0.09	46.60	13.32	5.24	5.02	10.75	2.94
	160	粉砂岩	12	0.35	44.10	12.22	4.57	4.21	13.69	2.84
	410	角砾岩	25	0.03	48.96	12.84	5.66	3.50	9.19	3.15
	500	泥岩	9	0.02	43.92	12.02	3.36	2.01	16.08	2.28
	600	角砾岩	10	0.04	42.87	12.67	4.28	4.56	13.57	1.55
	740	粉砂岩	14	0.02	43.18	13.17	4.10	2.64	15.35	2.03
	810	角砾岩	7	0.02	21.79	6.80	2.45	2.80	33.54	1.23

表3 研究区钻孔中微量元素含量  
Table 3 Trace element content in drilling holes in the research area

钻孔编号	深度/m	岩性	微量元素含量/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )								
			S	Pb	Zn	Cu	As	Cd	Hg	Au	Ag
ZK143-3	100	粉砂岩	105	8	57	11	8.7	$82 \times 10^{-9}$	$33 \times 10^{-9}$	$1.8 \times 10^{-9}$	$77 \times 10^{-9}$
	460	粉砂岩	957	14	48	47	364	$129 \times 10^{-9}$	$166 \times 10^{-9}$	$4.6 \times 10^{-9}$	$271 \times 10^{-9}$
	470	角砾岩	239 516	1 126	100	4 281	416 458	$3 977 \times 10^{-9}$	$2 777 \times 10^{-9}$	$1 050 \times 10^{-9}$	$49 080 \times 10^{-9}$
	619	角砾岩	12 987	217	257	202	2 236	$1 398 \times 10^{-9}$	$1 276 \times 10^{-9}$	$17 \times 10^{-9}$	$2 546 \times 10^{-9}$
ZK141-3	260	粉砂岩	167	40	79	83	57	$157 \times 10^{-9}$	$48 \times 10^{-9}$	$4.1 \times 10^{-9}$	$272 \times 10^{-9}$
	270	粉砂岩	141 866	1 038	100	295	2 356	$775 \times 10^{-9}$	$1 583 \times 10^{-9}$	$78 \times 10^{-9}$	$21 171 \times 10^{-9}$
	430	粉砂岩	459	7	39	21	18	$57 \times 10^{-9}$	$44 \times 10^{-9}$	$4.3 \times 10^{-9}$	$66 \times 10^{-9}$
ZK133-2	30	粉砂岩	273	16	34	17	50	$77 \times 10^{-9}$	$161 \times 10^{-9}$	$12 \times 10^{-9}$	$532 \times 10^{-9}$
	210	粉砂岩	4 092	50	61	71	69	$451 \times 10^{-9}$	$1 460 \times 10^{-9}$	$18 \times 10^{-9}$	$2 385 \times 10^{-9}$
	218	闪长玢岩	470	17	47	6	5.7	$86 \times 10^{-9}$	$26 \times 10^{-9}$	$2.4 \times 10^{-9}$	$60 \times 10^{-9}$
	250	粉砂岩	475	12	31	29	56	$191 \times 10^{-9}$	$45 \times 10^{-9}$	$2.0 \times 10^{-9}$	$94 \times 10^{-9}$
	280	角砾岩	7 183	24	68	18	294	$147 \times 10^{-9}$	$242 \times 10^{-9}$	$8.5 \times 10^{-9}$	$541 \times 10^{-9}$
	290	泥岩	34 817	41	61	46	630	$185 \times 10^{-9}$	$290 \times 10^{-9}$	$28 \times 10^{-9}$	$2 292 \times 10^{-9}$
	305	角砾岩	472	85	227	408	385	$831 \times 10^{-9}$	$977 \times 10^{-9}$	$13 \times 10^{-9}$	$1 415 \times 10^{-9}$
	380	粉砂岩	303	26	140	67	119	$301 \times 10^{-9}$	$248 \times 10^{-9}$	$26 \times 10^{-9}$	$228 \times 10^{-9}$
	410	中砂岩	141	33	86	27	46	$342 \times 10^{-9}$	$16 \times 10^{-9}$	$5.0 \times 10^{-9}$	$275 \times 10^{-9}$
	435	粉砂岩	9 581	74	143	5 409	182	$460 \times 10^{-9}$	$9 279 \times 10^{-9}$	$798 \times 10^{-9}$	$24 518 \times 10^{-9}$
	440	矿化层	90 957	19	16	396	121	$71 \times 10^{-9}$	$1 286 \times 10^{-9}$	$200 \times 10^{-9}$	$2 332 \times 10^{-9}$
520	细砂岩	1 060	9	38	17	19	$55 \times 10^{-9}$	$86 \times 10^{-9}$	$12 \times 10^{-9}$	$139 \times 10^{-9}$	
ZK124-1	50	角砾岩	1 456	120	213	55	259	$380 \times 10^{-9}$	$68 \times 10^{-9}$	$16 \times 10^{-9}$	$244 \times 10^{-9}$
	120	粉砂岩	590	37	117	110	120	$868 \times 10^{-9}$	$81 \times 10^{-9}$	$11 \times 10^{-9}$	$386 \times 10^{-9}$
	140	角砾岩	495	1 610	5 493	1 015	646	$25 249 \times 10^{-9}$	$233 \times 10^{-9}$	$33 \times 10^{-9}$	$466 \times 10^{-9}$
	200	粉砂岩	249	65	182	237	183	$991 \times 10^{-9}$	$1 052 \times 10^{-9}$	$99 \times 10^{-9}$	$765 \times 10^{-9}$
	210	角砾岩	2 961	859	664	723	666	$1 976 \times 10^{-9}$	$79 \times 10^{-9}$	$205 \times 10^{-9}$	$1 404 \times 10^{-9}$
	250	细砂岩	174	13	39	71	66	$94 \times 10^{-9}$	$543 \times 10^{-9}$	$2.8 \times 10^{-9}$	$382 \times 10^{-9}$
	290	角砾岩	281	365	184	97	571	$2 305 \times 10^{-9}$	$84 \times 10^{-9}$	$12 \times 10^{-9}$	$289 \times 10^{-9}$
	310	闪长玢岩	132	81	113	53	95	$1 200 \times 10^{-9}$	$35 \times 10^{-9}$	$7.0 \times 10^{-9}$	$125 \times 10^{-9}$
	410	角砾岩	159	60	199	51	133	$1 002 \times 10^{-9}$	$35 \times 10^{-9}$	$20 \times 10^{-9}$	$86 \times 10^{-9}$
460	细砂岩	190	28	108	28	119	$344 \times 10^{-9}$	$68 \times 10^{-9}$	$19 \times 10^{-9}$	$76 \times 10^{-9}$	
ZK116-1	120	粉砂岩	240	24	113	20	76	$314 \times 10^{-9}$	$13 \times 10^{-9}$	$3.5 \times 10^{-9}$	$62 \times 10^{-9}$
	240	角砾岩	2 525	53	77	112	70	$606 \times 10^{-9}$	$946 \times 10^{-9}$	$67 \times 10^{-9}$	$161 \times 10^{-9}$
	290	细砂岩	206	51	91	9.0	35	$938 \times 10^{-9}$	$446 \times 10^{-9}$	$1 092 \times 10^{-9}$	$121 \times 10^{-9}$
	430	角砾岩	267	57	116	38	165	$1 311 \times 10^{-9}$	$50 \times 10^{-9}$	$12 \times 10^{-9}$	$112 \times 10^{-9}$
	450	闪长玢岩	498	47	182	64	69	$531 \times 10^{-9}$	$13 \times 10^{-9}$	$5.5 \times 10^{-9}$	$133 \times 10^{-9}$
	550	角砾岩	251	65	105	71	77	$326 \times 10^{-9}$	$51 \times 10^{-9}$	$10 \times 10^{-9}$	$189 \times 10^{-9}$
640	细砂岩	1 291	29	114	59	36	$248 \times 10^{-9}$	$322 \times 10^{-9}$	$32 \times 10^{-9}$	$627 \times 10^{-9}$	
ZK91-1	20	粉砂岩	133	5.0	17	6.5	20	$36 \times 10^{-9}$	$32 \times 10^{-9}$	$0.7 \times 10^{-9}$	$186 \times 10^{-9}$
	160	粉砂岩	98	4.8	20	10	3.8	$47 \times 10^{-9}$	$12 \times 10^{-9}$	$3.3 \times 10^{-9}$	$88 \times 10^{-9}$
	410	角砾岩	7 975	76	95	50	2 509	$194 \times 10^{-9}$	$124 \times 10^{-9}$	$6.8 \times 10^{-9}$	$854 \times 10^{-9}$
	500	泥岩	326	8.4	25	14	5.4	$83 \times 10^{-9}$	$25 \times 10^{-9}$	$3.8 \times 10^{-9}$	$110 \times 10^{-9}$
	600	角砾岩	847	10	67	10	9.1	$193 \times 10^{-9}$	$69 \times 10^{-9}$	$3.8 \times 10^{-9}$	$90 \times 10^{-9}$
	740	粉砂岩	148	5.1	45	5.4	3.0	$88 \times 10^{-9}$	$24 \times 10^{-9}$	$1.1 \times 10^{-9}$	$54 \times 10^{-9}$
	810	角砾岩	761	13	141	12	35	$324 \times 10^{-9}$	$130 \times 10^{-9}$	$3.1 \times 10^{-9}$	$52 \times 10^{-9}$

### 3 讨论

以钻孔岩石测量结果为基础开展的元素富集贫化特征及规律研究结果表明,在该工区勘探钻孔中揭露主要类型岩石中基本上都发现有元素的富集和贫化现象。发生贫化的最典型元素是  $\text{Na}_2\text{O}$ , 其次是  $\text{SiO}_2$ , 形成显著的负异常; 发生富集的元素种类比较多, 有矿化剂元素 S, 成矿及伴生元素 Pb、Zn、Ag、Cu、Au、As、Cd、Hg 等以及常量元素  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 这些元素共同构成了研究区多金属成矿系统中的多属性异常体系。

钻孔内主要类型岩石中  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{SiO}_2$  等元素显著负异常的存在, 表明研究区早期形成的泥盆纪地层和石炭纪地层受到了强烈的后期热液活动影响。热液作用的结果, 导致地层中元素活化、迁移, 其中  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{SiO}_2$  等元素被带出, 发生贫化, 形成负异常。在  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{SiO}_2$  等元素被带出的同时, Pb、Zn、Ag、Cu、Au、As、Cd、Hg 以及  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、CaO 相对富集, 形成正异常。

代表性钻孔 ZK139-1 中多属性异常及其形成机制综合分析结果表明, 在目前发现矿体上盘近 60 m 的粉砂岩中,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量很低, 不到粉砂岩平均化学组成的一半, 推测是热液蚀变导致  $\text{Na}_2\text{O}$  被带出的结果。在这一地段, 矿化剂元素 S 和成矿元素 Pb、Zn、Ag、Cu 发生活化迁移, 元素迁移的方向是从浅部向深部, 据此推测, 产出在 130 ~ 190 m 的矿体或矿化体是由赋矿围岩中成矿元素迁移、富集的结果。元素活化迁移的直接证据就是存在  $\text{Na}_2\text{O}$  的负异常, 即  $\text{Na}_2\text{O}$  的负异常存在, 热液活动及由此引发的元素活化迁移就没有结束。这实际上是关于二人山地区多金属热液成矿, 即多属性地球化学异常形成机制的探索性结论。在 ZK139-1 钻孔已知矿体下部近 190 m 钻孔岩石中,  $\text{Na}_2\text{O}$  负异常稳定发育, 表明热液活动仍然存在。该钻孔底部 450 ~ 500 m 地段发现的 Ag、Pb、Zn、Cu 多金属矿化体, 不仅充分证实了本项研究中提出的该工区多属性异常形成机制的合理性, 也暗示了该工区其他地段深部仍然存在着发现多金属矿化体甚至是矿体的可能性, 因为工区内多数钻孔底部由  $\text{Na}_2\text{O}$  贫化而形成的负异常仍然存在。

试验钻孔中矿化剂元素 S 和成矿元素 Ag、Pb、Zn、Cu 含量变化统计结果显示, 在 F18 韧性剪切带上, 以 ZK139-1、ZK143-3、ZK141-3 钻孔连线为界, 从 F18 韧性剪切带东北部向该连线方向, 矿化剂元素 S 和成矿元素含量呈增加的趋势。结合 F18 韧性剪切带产状推测, 研究区 F18 韧性剪切带的西南部具

备更有利的成矿条件和成矿潜力。根据各试验钻孔所控制的地层及见矿情况综合分析, 在 F18 韧性剪切带西南部, 重点找矿目标层应该是石炭系前黑山组。

在 F18 韧性剪切带的东北部, 即现有钻孔控制的大部分地段, 由于部分钻孔深部  $\text{Na}_2\text{O}$  的贫化程度还很高, 说明热液活动范围较目前钻孔控制的范围更大, 深部仍具备成矿前提。成矿潜力要结合矿化剂元素和成矿元素等成矿物质条件综合分析, 石炭系前黑山组是最值得关注的找矿目标层。

### 4 结论

(1) 成矿地球化学系统中的多属性地球化学异常, 是成矿地质作用在微观地球化学层面的客观反映, 多维异常体系揭示了成矿地质环境中客观存在的规律, 对多维异常体系的深入认知, 理清了开展成矿前景评价、深部矿体勘查中地球化学理论和方法研究的思路, 将对勘查地球化学学科的发展和进步产生广泛而深远影响。

(2) 研究区存在着以常量元素  $\text{Na}_2\text{O}$  为主要特征的负异常, 已知多金属矿(化)体均产出在  $\text{Na}_2\text{O}$  负异常体系之内。在已知矿(化)体产出部位均出现明显矿化剂元素 S 的异常, 这与研究区发育的主要成矿物质方铅矿、闪锌矿、黄铁矿相吻合, 当然也要注意出现矿化剂 S 异常的部位并不是都有矿(化)体产出, 由此也表明矿化剂元素异常体系只能代表总体矿化强度, 并不能明确指示矿化类型。

(3) 试验钻孔中矿化剂元素 S 和成矿元素 Ag、Pb、Zn、Cu 含量变化统计结果显示, F18 韧性剪切带东北部向西南方向, 矿化剂元素 S 和成矿元素含量呈增加的趋势。结合 F18 韧性剪切带产状推测, 研究区 F18 韧性剪切带的西南部具备更有利的成矿条件和成矿潜力。在 F18 韧性剪切带的东北部, 部分钻孔深部  $\text{Na}_2\text{O}$  的贫化程度还很高, 说明热液活动范围较目前钻孔控制的范围更大, 深部仍具备成矿前提。

### 参 考 文 献

- [1] 樊新祥, 李省晔, 赵吉昌, 等. 甘肃北山双井子地区 1:25 000 水系沉积物测量地球化学特征及找矿预测[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(36): 15938-15951.  
Fan Xinxiang, Li Shengye, Zhao Jichang, et al. Geochemical characteristics and prospecting prediction of 1:25 000 stream sediments in Shuangjingzi area, Beishan, Gansu Province[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(36): 15938-15951.
- [2] 智云宝, 魏正宇, 郝兴中, 等. 山东栖霞毕郭地区 1:50 000 水系沉积物测量异常特征及找矿预测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6327-6338.

- Zhi Yunbao, Wei Zhengyu, Hao Xingzhong, et al. Anomaly characteristics and prospecting prediction of 1: 50 000 stream sediment survey in Biguo area, Qixia, Shandong Province[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(15): 6327-6338.
- [3] 刘亮, 王超, 余长荣, 等. 综合物化探方法在青海珊旗根玛金锑矿点的运用[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(4): 1337-1343.
- Liu Liang, Wang Chao, Yu Changrong, et al. Application of comprehensive geophysical and geochemical prospecting method in Shanqigenma Au-Sb deposit, Qinghai Province[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(4): 1337-1343.
- [4] 马生明, 朱立新, 刘崇民, 等. 斑岩型 Cu(Mo) 矿床中微量元素富集贫化规律研究[J]. 地球学报, 2009, 30(6): 821-830.
- Ma Shengming, Zhu Lixin, Liu Chongmin, et al. A study of the enrichment and depletion regularity of trace elements in porphyry Cu (Mo) deposits[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(6): 821-830.
- [5] 马生明, 朱立新, 刘海良, 等. 甘肃北山辉铜山铜矿地球化学异常结构研究[J]. 地球学报, 2011, 32(4): 405-412.
- Ma Shengming, Zhu Lixin, Liu Hailiang, et al. A study of geochemical anomaly structure of the Huitongshan copper deposit in Beishan area, Gansu Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(4): 405-412.
- [6] 马生明, 朱立新. 热液成因有色金属矿多异常体系——以马头斑岩型铜钼矿为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014(1): 134-144.
- Ma Shengming, Zhu Lixin. Multidimensional anomaly system for hydrothermal nonferrous metal deposits: taking the Matou porphyry molybdenum copper mine in Anhui Province as an example[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2014, 44(1): 134-144.
- [7] 陈宏强, 马生明, 岑况, 等. 新疆东准布伦布拉克斑岩型铜矿床元素迁移规律研究及成矿预测[J]. 地质与勘探, 2015, 51(6): 1138-1149.
- Chen Hongqiang, Ma Shengming, Cen Kuang, et al. Regularities of element migration and metallogenic prediction in the Wulunbulake porphyry copper deposit, eastern Junggar, Xinjiang[J]. Geology and Exploration, 2015, 51(6): 1138-1149.
- [8] 陈宏强, 马生明, 岑况, 等. 新疆东准噶尔伊克勒克斑岩型铜矿床岩石地球化学勘查及成矿预测[J]. 现代地质, 2016, 30(3): 503-513.
- Chen Hongqiang, Ma Shengming, Cen Kuang, et al. The Rock geochemical exploration and metallogenic prediction in the Layikeleke porphyry copper deposit, eastern Junggar, Xinjiang[J]. Geoscience, 2016, 30(3): 503-513.
- [9] 彭芊芊, 陈海燕, 张运强, 等. 斑岩-接触交代复合型金属矿多异常体系——以河北省小寺沟铜钼矿床为例[J]. 地质论评, 2023, 69(S1): 158-160.
- Peng Qianqian, Chen Haiyan, Zhang Yunqiang, et al. Multi-dimensional anomaly system of porphyry-contact metasomatic complex metal deposit: a case study of Xiaosigou copper-molybdenum deposit, Hebei Province[J]. Geological Review, 2023, 69(S1): 158-160.
- [10] 刘艳鹏, 朱立新, 马生明. 安徽省兆吉口铅锌矿床成矿地球化学机制研究[J]. 地球学报, 2017, 38(S1): 75-77.
- Liu Yanpeng, Zhu Lixin, Ma Shengming. The ore-forming geochemical mechanism of the Zhaojikou Pb-Zn ore deposit, Anhui Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(S1): 75-77.
- [11] 贾大为. 内蒙古高石山地区铜多金属矿的地球化学多维异常靶区优选[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- Jia Dawei. Targets selection of copper polymetallic deposits by sorting geochemical multi-dimensional anomalies in Gaoshishan area, Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [12] 艾宁, 任战利, 李文厚, 等. 宁夏卫宁北山地区矿床类型及成矿时代[J]. 矿床地质, 2011, 30(5): 941-948.
- Ai Ning, Ren Zhanli, Li Wenhou, et al. Metallogenic epoch and ore-forming types of ore deposits in Weiningbeishan area, Ningxia [J]. Mineral Deposits, 2011, 30(5): 941-948.
- [13] 尹秉喜, 孟方, 杨勇. 物化探技术在二人山-黄石坡沟多金属矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2012, 36(6): 898-901.
- Yin Bingxi, Meng Fang, Yang Yong. The application of geophysical and geochemical technology to the prospecting for polymetallic deposits in Errenshan-Huangshipogou area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(6): 898-901.
- [14] 杨勇, 尹秉喜. EH-4 在卫宁北山地区多金属找矿中的应用[J]. 宁夏工程技术, 2013, 12(1): 24-26.
- Yang Yong, Yin Bingxi. Application of EH-4 in polymetallic mine exploration in the region of Weiningbeishan [J]. Ningxia Engineering Technology, 2013, 12(1): 24-26.
- [15] 付文祥, 尹秉喜, 杨文明. EH-4 电磁成像系统在隐伏多金属矿勘查中的应用——以二人山-黄石坡沟多金属矿为例[J]. 物探与化探, 2015, 39(3): 485-489.
- Fu Wenxiang, Yin Bingxi, Yang Wenming. The application of the EH-4 electromagnetic imaging system in search for concealed polymetallic deposits: a case study of the Errenshan-Huangshipogou polymetallic deposit [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(3): 485-489.
- [16] 宋新华, 李红宇. 宁夏中卫市大铜沟铜矿地质特征及控矿因素浅析[J]. 矿产与地质, 2009, 23(2): 118-123.
- Song Xinhua, Li Hongyu. Geological characteristics and ore-controlling factors of the Datonggou copper deposit in Zhongwei City of Ningxia[J]. Mineral Resources and Geology, 2009, 23(2): 118-123.
- [17] 刘勇, 李廷栋, 王彦斌, 等. 宁夏卫宁北山金场子闪长玢岩岩脉地质特征及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 中国地质, 2010, 37(6): 1575-1583.
- Liu Yong, Li Tingdong, Wang Yanbin, et al. Geological characteristics and SHRIMP zircon U-Pb age of Jinchangzi diorite porphyrite dikes in Beishan, Weining, Ningxia[J]. Geology in China, 2010, 37(6): 1575-1583.
- [18] 仲佳鑫, 李欢, 李鹏, 等. 宁夏卫宁北山金场子金矿床地质特征与控矿因素分析[J]. 西北地质, 2012, 45(3): 81-92.
- Zhong Jiaxin, Li Huan, Li Peng, et al. Geological characteristics and ore-controlling factors of Jinchangzi gold deposit in Beishan, Weining, Ningxia[J]. Northwest Geology, 2012, 45(3): 81-92.
- [19] 艾宁. 宁夏卫宁北山金场子金矿床地质与地球化学研究[D]. 西安: 西北大学, 2014.
- Ai Ning. Studies on the geochemical and geological characteristics of Weiningbeishan Jinchangzi gold deposit [D]. Xi'an: Northwest University, 2014.
- [20] 海连富, 刘金科, 李海峰, 等. 宁夏卫宁北山多金属矿床地质

- 特征与找矿方向[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(1): 30-39.
- Hai Lianfu, Liu Jinke, Li Haifeng, et al. Geological characteristics and prospecting directing of Weiningbeishan polymetallic deposit, Ningxia[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 35(1): 30-39.
- [21] 海连富, 刘安璐, 陶瑞, 等. 宁夏卫宁北山金场子金矿床流体来源及矿床成因: 来自流体包裹体和 C-H-O 同位素证据[J]. 地球科学, 2021, 46(12): 4274-4290.
- Hai Lianfu, Liu Anlu, Tao Rui, et al. Source of fluid and genesis of Jinchangzi gold deposit in Weiningbeishan, Ningxia; evidence from fluid inclusions and C-H-O isotopes [J]. Earth Science, 2021, 46(12): 4272-4290.
- [22] 李海峰, 赵风顺, 刘金科, 等. 宁夏金场子金矿床关键控矿因素分析及找矿方向[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 8770-8778.
- Li Haifeng, Zhao Fengshun, Liu Jinke, et al. Analysis of ore-controlling factors and prospecting direction of Jinchangzi gold deposit in Ningxia[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(21): 8770-8778.
- [23] 宋新华, 尹秉喜, 闫红, 等. 航磁资料在卫宁北山寻找多金属矿中的应用[J]. 物探与化探, 2010, 34(3): 289-293.
- Song Xinhua, Yin Bingxi, Yan Hong, et al. The relationship between the aeromagnetic weak anomalies and the polymetallic ore deposits (ore spots) in the Beishan Mountain, Weining[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(3): 289-293.
- [24] Robertson I D M, Taylor G F. Depletion haloes in fresh rocks surrounding the cober orebodies, N. S. W., Australia: implications for exploration and ore genesis[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1987, 27: 77-101.
- [25] Goldberg I S, Abramson G Y, Los V L. Depletion and enrichment of primary haloes; their importance in the genesis of and exploration for mineral deposits[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2003, 3(3): 281-293.