

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.02.024

元素等量浓集概念及其应用

——以陕西宁强县中坝矿区土壤测量异常解释为例

王占彬, 马承, 杨可*, 张晓星, 刘基, 寇少磊, 田渊

(中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710000)

摘要:矿产资源是一类有用元素高度富集的特殊地质体。为便于对比研究各元素在成矿作用过程中富集离散规律,笔者提出了等量浓集概念。将各元素从克拉克值到矿体边界品位的浓集过程进行等量划分,使得不同元素间富集程度具有定量可比性,即在同一等量浓集级次上各元素具有同等富集程度和成矿潜力。将该方法应用于扬子北缘后龙门山造山带内的中坝矿区,取得了良好成效。从中坝矿区等量浓集直方图可知,主成矿元素为 Au、Ag、Mo,成矿伴生元素为 Cu、Zn,找矿指示元素为 As、Sb、Pb;等量浓集地球化学图可以清晰突显出该区元素分区边界,指导厘定了志留系与寒武系界线,同时发现 Au 元素比其他元素有更高的浓集程度;通过等量浓集 7 级异常划分,圈定了较好的 Au、Cu、Mo 等元素异常,在 7 级 Au 异常区查证发现了辛家咀金矿。实践表明,应用等量浓集原理研究元素分布、分配及富集离散规律简便而实用。

关键词:等量浓集;中坝;土壤测量;金矿;宁强

中图分类号:P595

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)02-0271-13

The Concept and Application of Element Equivalent-concentrating: A Case Study for Anomaly Interpretation of Soil Survey from Zhongba Mining Area, Ningqiang County, Shaanxi Province

WANG Zhanbin, MA Cheng, YANG Ke*, ZHANG Xiaoxing, LIU Ji, KOU Shaolei, TIAN Yuan

(Xi'an Mineral Resources Investigation Center, CGS, Xi'an 710000, Shaanxi, China)

Abstract: Mineral resources are a kind of special geological body highly enriched in useful elements. In order to facilitate the comparative study of the enrichment and dispersion laws of various elements in the process of mineralization, the author proposed the concept of equivalent-concentrating, which equally divided the concentration process of each element from the Clark value to the boundary grade of the ore body, so that the enrichment degree of different elements is quantitatively comparable, that is, each element has the same enrichment degree and metallogenic potential at the same equivalent-concentrating level. This method was applied to the Zhongba mining area in the Back-Longmenshan orogenic belt on the northern margin of Yangtze plate, and achieved good results. Through the element equivalent-concentrating histogram, it can be known

收稿日期:2021-11-26;修回日期:2022-01-30;网络发表日期:2022-05-10;责任编辑:李辉

基金项目:中国地质调查局项目“秦岭地区金银矿资源勘查”(编号:DD20208008)。

作者简介:王占彬(1987-),男,工程师,主要从事应用地球化学工作。E-mail:406604601@qq.com。

*通讯作者:杨可(1986-),男,工程师,主要从事矿产勘查工作。E-mail:yangke051302@163.com。

that the main ore-forming elements in the Zhongba mining area are Au, Ag, Mo, the ore-forming associated elements are Cu, Zn, and the indicator elements are As, Sb, Pb; the geochemical maps in equivalent-concentrating method can clearly highlight the elemental boundaries of the area, guide the determination of the Silurian and Cambrian stratigraphic boundaries in the area, and it is found that Au has a higher degree of concentration than other elements; The anomalies are delineated such as Au, Cu, Mo, etc. and the Xinjiuzui gold mine was found in the grade 7 gold anomaly area. Practice shows that it is simple and practical to apply the principle of element equivalent-concentrating to study the elements distribution and the law of enrichment dispersion.

Keywords: equivalent-concentrating; Zhongba; soil survey; gold deposit; Ningqiang

勘查地球化学是使用地球化学原理进行找矿的典型应用(蒋敬业等,2006),是一种通过系统采集天然物质,测量其地球化学性质,发现各类地球化学异常,进而寻找矿床的方法,具有直接性、高效性与经济性(宋贺民等,2014;杜保峰等,2018;侯长才等,2019;段吉学等,2019)。

从勘查地球化学角度来看,矿床本身就是一种元素高度富集的地质体(张德会,2015)。元素的克拉克值、矿体边界品位及浓集系数是判断化探元素含量高低和找矿潜力大小的重要标尺。传统化探数据统计分析、异常下限选取、地球化学图制作等往往只考虑元素与背景值或克拉克值这把标尺的对比关系,很少将各元素同时放置于克拉克值与边界品位的双重标尺内分析研究。如在异常下限选取方面,传统方法以均值标准差法最为常见(无锡生,1993;韩东昱等,2004),这是一种基于元素数据集自身统计分析结果,不考虑异常下限与矿体边界品位关系,各元素之间的异常下限及异常分级也无可比性。对此,前人进行了有益探索。如李明喜等(1999)提出了浓幅分位概念,将元素在某种介质中的背景估计值与矿体边界品位进行标准化处理,以浓幅分位值来研究元素的富集程度和成矿潜力;Gong Qingjie, et al. (2018)、向运川等(2018)提出了7级异常划分方案,将矿体边界品位与某一区域元素背景值的对数差按照等差或对数等差的方式进行异常分级。以上2种方法的提出为元素异常圈定和对比提供了新思路。笔者试图在前人探索实践的基础上,提出元素等量浓集概念,即将所有元素从克拉克值到边界品位的浓集过程进行归一化处理 and 等量分级,为元素分布、分配规律的对比研究、成矿元素和伴生元素优选、等量浓集地球化学图绘制及异常下限确定等问题提供理论依据与解决办法,使得此类基于背景

和矿体边界双重考虑的分析方法更为简单实用。

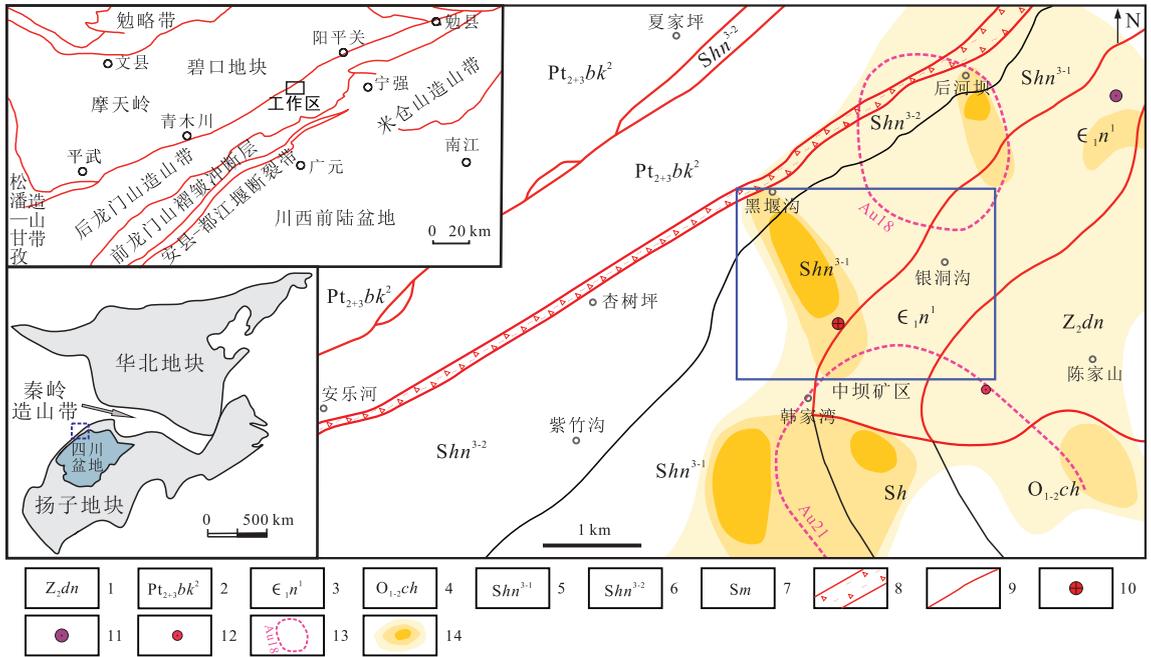
1 研究区地质概况

研究区位于扬子地台北缘,北接摩天岭地块,西邻松潘-甘孜褶皱带,处于扬子陆块北缘龙门山-大巴山铁-铜-铅-锌-锰-磷-硫-重晶石-铝土矿成矿带内(马润华等,2007;朱裕生等,2007),行政区属陕西汉中市宁强县燕子砭镇中坝村。

区内出露地层主要有中新元古界碧口岩群、震旦系灯影组、寒武系牛蹄塘组、奥陶系陈家坝组、志留系黄坪组和滑天坡组;地层总体呈北东向条带状展布(图1)。具体发育特征是:震旦系灯影组位于该区东南角,为一套浅海相碎屑岩和碳酸盐岩沉积,出露面积较小,主要由白云岩、灰岩、白云质灰岩、粉砂岩组成;中新元古界碧口岩群位于研究区西北,为一套浅变质的海相火山-沉积建造,岩性为细碧岩、角斑岩、角斑质凝灰岩;寒武系牛蹄塘组位于研究区东部,为次深海-深海相沉积的一套黑色岩系,主要有含碳硅质板岩、含碳粉砂质板岩、硅质岩,富集了众多金属元素;奥陶系陈家坝组位于该区东南外围,为一套浅变质碎屑岩地层体,岩性为砂岩、碳质或石英质千枚岩;志留系黄坪组位于研究区西部,岩性为千枚岩、粉砂质千枚岩、铁质菱镁矿千枚岩,是该区金矿的主要赋矿地层;志留系茂县群滑天坡组位于区南侧外围,岩性为碳质千枚岩、千枚岩夹变质砂岩和砂泥质灰岩。

区内岩浆岩不发育,仅有少量花岗岩脉和闪长岩脉零星出露。

该区构造活动频繁,区内断裂、褶皱发育广泛。断裂构造以北东向为主,从研究区北侧边缘穿过燕子砭-金山寺断裂,为多期活动的区域性大断裂,是



1. 震旦系灯影组白云岩、灰岩、白云质灰岩;2. 中新元古界碧口岩群细碧岩、角斑岩、角斑质凝灰岩;3. 下寒武统牛蹄塘组含碳硅质板岩、含碳粉砂质板岩、硅质岩;4. 中下奥陶统陈家坝组砂岩、千枚岩;5. 志留系黄坪组上段第一亚段铁质菱镁矿千枚岩、千枚岩;6. 志留系黄坪组上段第二亚段粉砂质千枚岩、千枚岩;7. 志留系茂县群滑天坡组碳质千枚岩、千枚岩夹变质砂岩和砂泥质灰岩;8. 燕子砭-金山寺断裂带;9. 断层;10. 辛家咀金矿;11. 中坝锰矿;12. 柏杨桃树垭褐铁矿化点;13. 1:20万化探 Au 异常;14. 1:5万化探 Au 异常

图1 中坝地质简图(据李智武等,2019;钟俊,2019修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Zhongba area

碧口地块与扬子北缘的分界断裂。区内断裂与地层展布方向一致,均为北东向。在研究区西南寒武系牛蹄塘组和志留系黄坪组接触带附近,发育一条走向北东、倾向北西的韧性剪切带,带内硅化、黄铁矿化发育,与金成矿关系紧密。区内地层均为断层接触,呈单斜构造,属复式背斜一翼,褶皱形迹总体北东向,核部以震旦系为主。

区域上金、铜、铅锌、锰、银、铁等矿床较多,有丁家林、铍厂沟、东沟坝、煎茶岭、李家沟、八海、玉泉坝、青木川等金矿床(点);天台山、胡家湾、水晶坪、中坝等锰矿床;大茅坪、刘家坪等铜多金属矿床。

中坝地区主要有中坝锰矿、辛家咀金矿(本次工作新发现)、柏杨桃树垭褐铁矿化点。中坝锰矿为沉积变质型矿床,产于下寒武统牛蹄塘组中;矿体厚为0.5~3 m, Mn品位为7%~35%,矿体呈层状产出;锰矿石成分主要为软锰矿,次为褐锰矿、铁锰矿及碳酸锰;矿石具块状、条带状构造。辛家咀金矿为与韧性剪切带有关的蚀变岩型和石

英脉型金矿,金矿体呈透镜状分布志留系黄坪组上岩段北东向韧性剪切带内,其分布严格受该韧性剪切带控制;金矿石主要为剪切带中石英脉及其两侧的蚀变岩;围岩以绢云石英片岩及糜棱岩为主。柏杨桃树垭褐铁矿化点产于牛蹄塘组中,为风化淋积型褐铁矿化,规模较小。

中坝地区化探异常发育,研究区位于1:20万碧口幅Hs-16(李家沟)异常的西部,异常元素有Ba、Ag、Mo、Sb、Zn、Hg、Au、As、Cu、Pb、Ni、P等,各元素异常套合好,浓集中心显著。Au异常主要位于后河坝与韩家湾,Hs-16异常内发现热液成因的重晶石矿点1处、采银(金)古铜1处(孙克俭等,1989),异常与断裂构造关系紧密,由多期热液活动所致,找矿潜力较好;1:5万水系沉积物测量在该区圈定了面积25 km²的Au异常1处,Au均值为21.9×10⁻⁹,在黑堰沟一带检查发现含Au矿化蚀变带1条(樊战军,1999)。该区Au异常突出、成矿地质条件有利。因此,部署开展了1:10 000土壤测量,并取得了良好成效。

2 等量浓集概念

成矿作用本质是元素在特定地质作用下高度富集的过程和机理,是一种复杂性、综合性的动力学过程(张德会,2015)。不同矿床成矿过程、成矿机理不同,但元素从背景丰度要浓集成为矿体需多次富集才能达到工业矿体。为简化各类矿床成矿元素富集过程,便于对比研究,笔者首次提出元素等量浓集概念。设定各元素克拉克值为其矿床形成的元素初始浓度,经过 n 次等量浓集(等倍数浓集,即元素每浓集一级后其丰度与前一级丰度之比为定值),达到了矿体边界品位。设定元素克拉克值为 C_k ,矿体边界品位为 C_g ,浓集系数为 $K=C_g/C_k$ 。定义 a 为元素等量浓集分级系数:

$$a = \sqrt[n]{K} \quad (1)$$

式中 K 为浓集系数,指元素矿体边界值与其克拉克值的比值; n 为元素从克拉克值浓集到矿体边界的总级次数, n 的取值可以根据研究目的灵活设定;分级系数 a 表征了元素在等量浓集时所需的浓集能力大小,不同成矿元素浓集系数差别较大,对应分级系数也不同。元素在浓集到第 i 级($i=0,1,2,\dots,n$)时,所对应的含量定义为 C_i ,则含量 C_i 为:

$$C_i = C_k \times a^i \quad (2)$$

依据上述等量浓集原理,可为元素分布、分配规律对比研究提供新途径,当浓集倍数 n 给定时,对于某研究区域所有样品元素含量值均可分布于 $n+1$ 级含量区间中(含量低于克拉克值的部分作为一个特低背景分区;高于矿体边界品位的部分,按矿体边界品位处理,不单独分区)。当研究元素分配特征时,可依据元素各等量浓集分级所含样本数,制作元素等量浓集直方图;研究元素空间分布规律、富集贫化特征时,可用一定间隔抽取的等量浓集分级所对应含量值制作元素地球化学图或异常图。

等量浓集直方图:当设定研究区元素浓集总级数 $n=100$ 时,以分级级次为横坐标,各分级区间样本数为纵坐标,可得到该区元素的等量浓集直方图。

等量浓集地球化学图:依据元素克拉克值和边界品位,按等量浓集原理进行等间隔分级。当总级数 $n=100$ 时,则元素含量可分为 101 级含量区间,以 5 级为等差间隔,从克拉克值到边界品位共能抽取 21 级,用抽取的各级次对应元素含量勾绘地球化

学图,即为元素等量浓集地球化学图。

等量浓集异常图:异常确定与元素背景含量有关。统计研究区元素背景值,将背景值与矿体边界对应的等量浓集分级级差均分为 7 阶,每阶所对应元素含量,即是 7 级等量浓集异常分级值。

设 C_b 为研究区背景值, x 为背景值所处的等量浓集分级级次,则:

$$C_b = C_k \times a^x \quad (3)$$

$$x = \log_a C_b / C_k \quad (4)$$

设 Δ 为 7 级异常分级级次间隔,则:

$$\Delta = \frac{n-x}{7} \quad (5)$$

设 T_i 为第 i 级异常值,则:

$$T_i = C_k \times a^{x+i\Delta-S} \quad (6)$$

式中 i 为异常级次,取 1~7 整数; S 为异常调整系数,与背景值高低、异常级次等有关, S 具体为:

$$S = \frac{7-i}{6} \times \frac{x}{n} \times \Delta \quad (7)$$

3 等量浓集原理在中坝矿区土壤异常解释中的应用

中坝矿区开展了 1:10 000 土壤地球化学测量 5 km²,采样网度 100 m×20 m,样品粒级为-10~+60 目,采集样品 2 510 件,含重采样 44 件;分析测试元素有 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、W、Mo 等,统计了土壤地化特征参数(表 1)。

根据等量浓集原理,以中坝地区土壤地球化学测量数据为例,当浓集倍数 $n=100$ 时,制作了该区 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、W、Mo 等元素的等量浓集直方图、等量浓集地球化学图及部分元素的等量浓集异常图,为研究该区元素分布、分配特征、富集、贫化规律,以及指导地质找矿工作提供了依据。

3.1 中坝矿区元素等量浓集直方图

以中坝矿区土壤地球化学测量数据为基础,当元素浓集总级数 $n=100$ 时,制作得到该区 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、W、Mo 等元素的等量浓集直方图(图 2)。从直方图可见,矿区元素分布形态各异,有呈单峰分布的,如 Pb、W,说明在成岩、成矿过程中未引起上述元素的明显分异;有呈双峰分布的,如 Sb、Ag、Zn、Cu、Mo 等,表明这些元素受岩性或成矿活动控制,有明显的分异或富集;也有呈叠加态双峰

表 1 土壤地球化学测量数据统计表

Tab. 1 Statistics of soil geochemical measurements

参数	Au	Ag	As	Sb	Cu	Zn	Mo	W	Pb
平均值(<i>X</i>)	19.3	958	58.4	7.96	101	209	16.78	1.73	39.5
中位数(<i>M</i>)	6.2	341	41.3	2.74	45.1	131	1.53	1.47	33.3
标准离差(<i>S</i>)	77	1 213	58.5	12.0	148.4	179	26.45	1.05	50.7
变化系数(<i>Cv</i>)	3.98	1.27	1.0	1.51	1.46	0.86	1.58	0.61	1.28
最大值	2 180	11 300	729	100	3 211	3 200	284	17.5	2 227
最小值	0.38	30	2.33	0.21	1.5	15	0.5	0.5	5

注: Au、Ag 含量为 10^{-9} , 其他为 10^{-6} 。

分布的,如 As,说明受成岩成矿影响,区内 As 有一定分异但不强烈。从直方图可知,本区元素丰度均显著高于克拉克值,与该区热液成矿活动及广泛分布的黑色岩系有关。

根据上述元素等量浓集原理,在直方图中,样品元素含量越靠近右端,表明其含量越高,越接近矿石丰度;当其含量越靠近左端,表明其含量越低,越接近地壳丰度。根据矿区成矿规律和找矿实践认为,当直方图中元素在 0~100 级次之间几乎都有分布时,如 Au、Mo、Ag 则为该区的主成矿元素,此类元素异常极强,成矿潜力极大,在区内都有对应矿化、矿体出现。例如,在矿区银洞沟有古采银铜子 1 处;在矿区辛家咀-万家山一带,有产于韧性剪切带中的金矿脉;在下寒武统牛蹄塘组黑色页岩中,有 Mo、Mn、V 等元素矿化显示(图 3)。

当元素分布在 0~76 级次之间,则为该区矿化伴生元素,如 Cu、Zn 有高强异常出现,局部形成了矿化。如在矿区火地沟一带见多处石英脉包裹或穿插于硅化灰岩中,在石英脉中可见闪锌矿化、黄铁矿化;在火地沟西南民采坑洞内见铜银矿化发育于牛蹄塘组石英脉中;在辛家咀金矿脉上,多见黄铜矿化、黄铁矿化及闪锌矿化(图 3)。

当元素主要分布在 0~51 级次之间时,为重要的指示元素,如 As、Sb、Pb 异常较为发育,但较少见到此类金属矿化。

当元素分布在 0~26 级次之间时,如 W,此类元素富集程度较低,受区内成矿活动影响不显著,异常较弱,找矿指示意义不大。

综上所述,等量浓集直方图可直观便捷掌握元素的分布规律和富集程度,也能准确判断区内的主成矿元素、伴生元素及指示元素,为化探工作者提供极大便利。

3.2 中坝矿区元素等量浓集地球化学图

3.2.1 传统累频法地球化学图

传统地球化学图等量线勾绘以累积频率法应用最广,该方法是将元素按含量高低排序,依次以一定频率间隔进行分级,根据频率分级对应的含量值勾绘地球化学图。此类地球化学图更多的关注各样品元素相对含量高低及元素的累频分布特征。不管元素丰度高低,有无成矿可能,都能按一定频率区间勾绘出高、中、低地球化学分级区域。

从中坝矿区累频法地球化学图(图 4)可知,各元素都能根据各自含量-频率关系直观反映元素丰度变化规律。中坝矿区所有元素在寒武系牛蹄塘组黑色页岩中含量较高,而在志留系黄坪组千枚岩中丰度较低。传统累频法地球化学图对低背景区的元素变化特征反应较为清晰,如 Mo、Zn、Pb 等元素在黄坪组含量较低且变化起伏不大,但在地球化学图中都能反应出其细微差别。但各元素丰度与克拉克值、矿体边界含量的对比,从传统地球化学图上无法直观判定,各元素间的浓集程度也从地球化学图上无法判断对比。

3.2.2 等量浓集地球化学图

根据元素克拉克值与边界品位,按照等量浓集原理进行等间隔分级,将中坝矿区元素分为 21 级次(表 2),用各分级对应元素含量勾绘等量浓集地球化学图(图 4),特征如下。

(1)能基本保留传统累频法地球化学所展示的元素分布规律和变化趋势,还能突显元素的梯度变化带。从等量浓集地球化学图可知,该区元素高背景区或异常区多呈北东向条带状分布,与累频法地球化学图表现一致;对于受地层控制且背景值差异显著的元素,如 Mo、Ag、Cu、Zn、Sb 等,等量浓集地球化学图能清晰准确地显示出其丰度突变界线;而在传

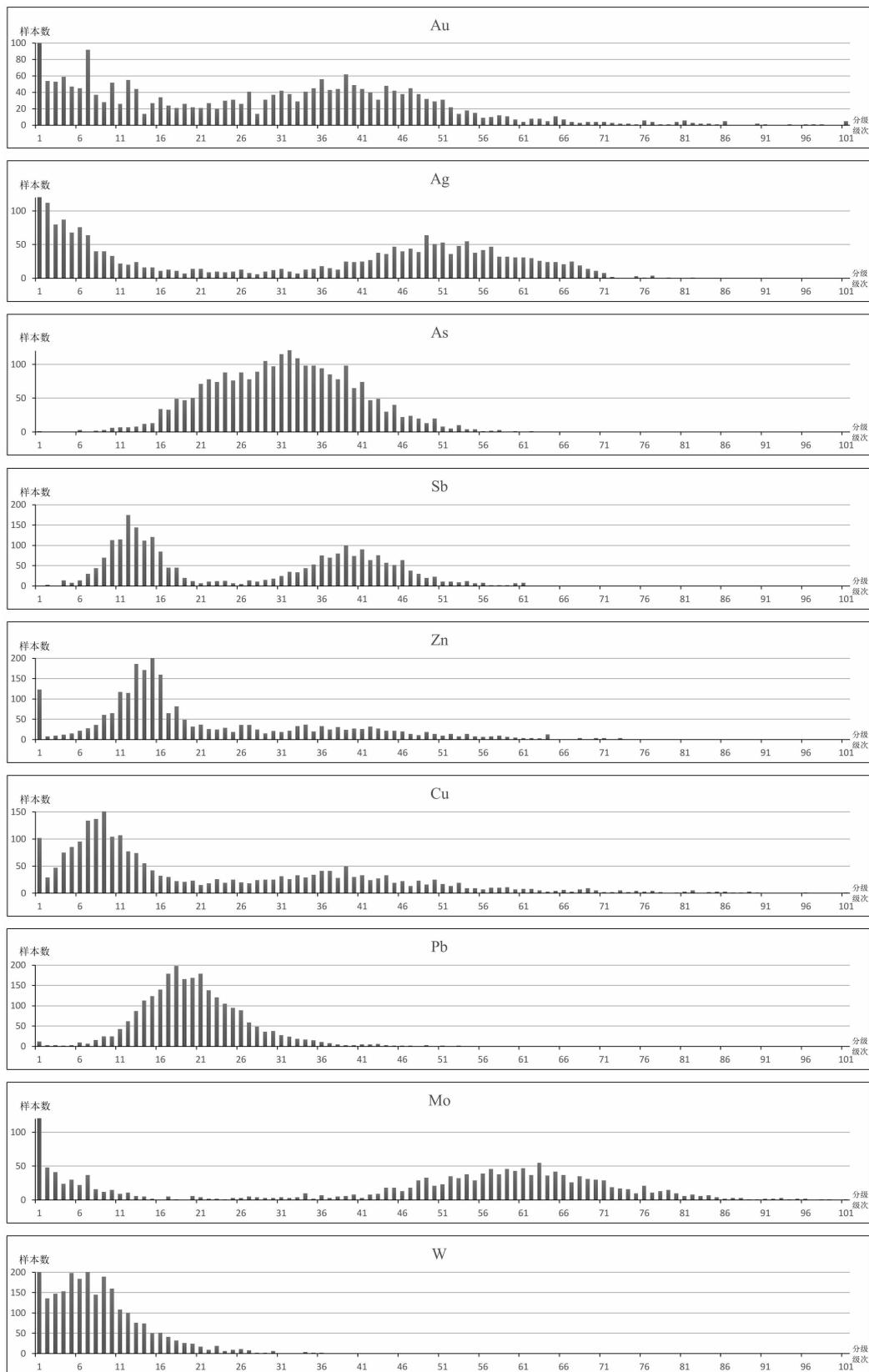
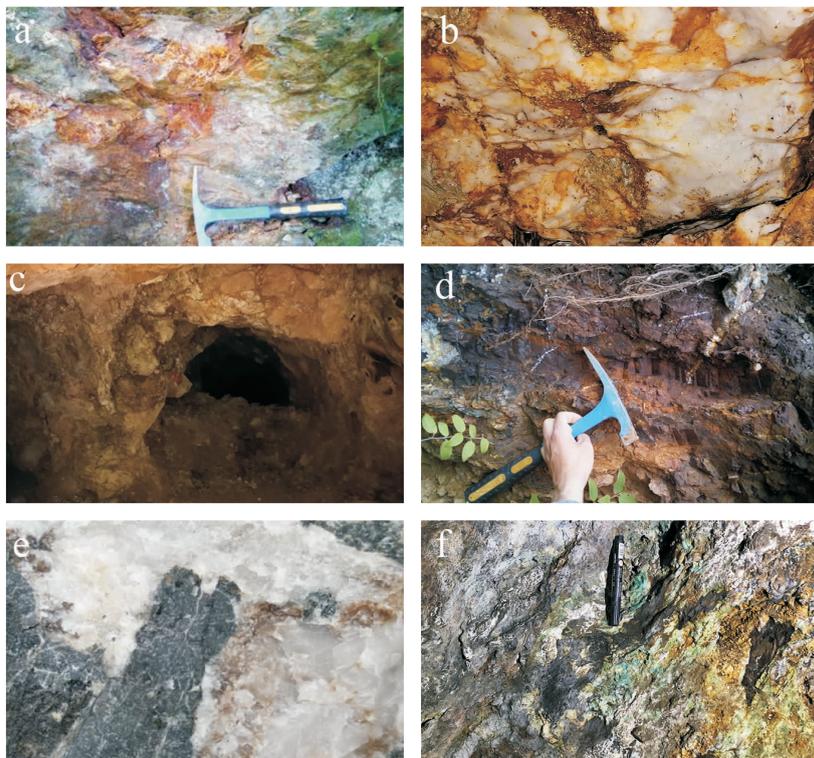


图2 中坝矿区元素等量浓集直方图

Fig. 2 The element equivalent-concentrating histogram in Zhongba mining area



a. 辛家咀金矿脉地表露头; b. 辛家咀含 Au 石英脉; c. 银洞沟古采银洞; d. 中坝锰矿石;
e. 火地沟闪锌矿化石英脉; f. 火地沟铜银矿化

图 3 中坝地区锰金多金属矿化特征图

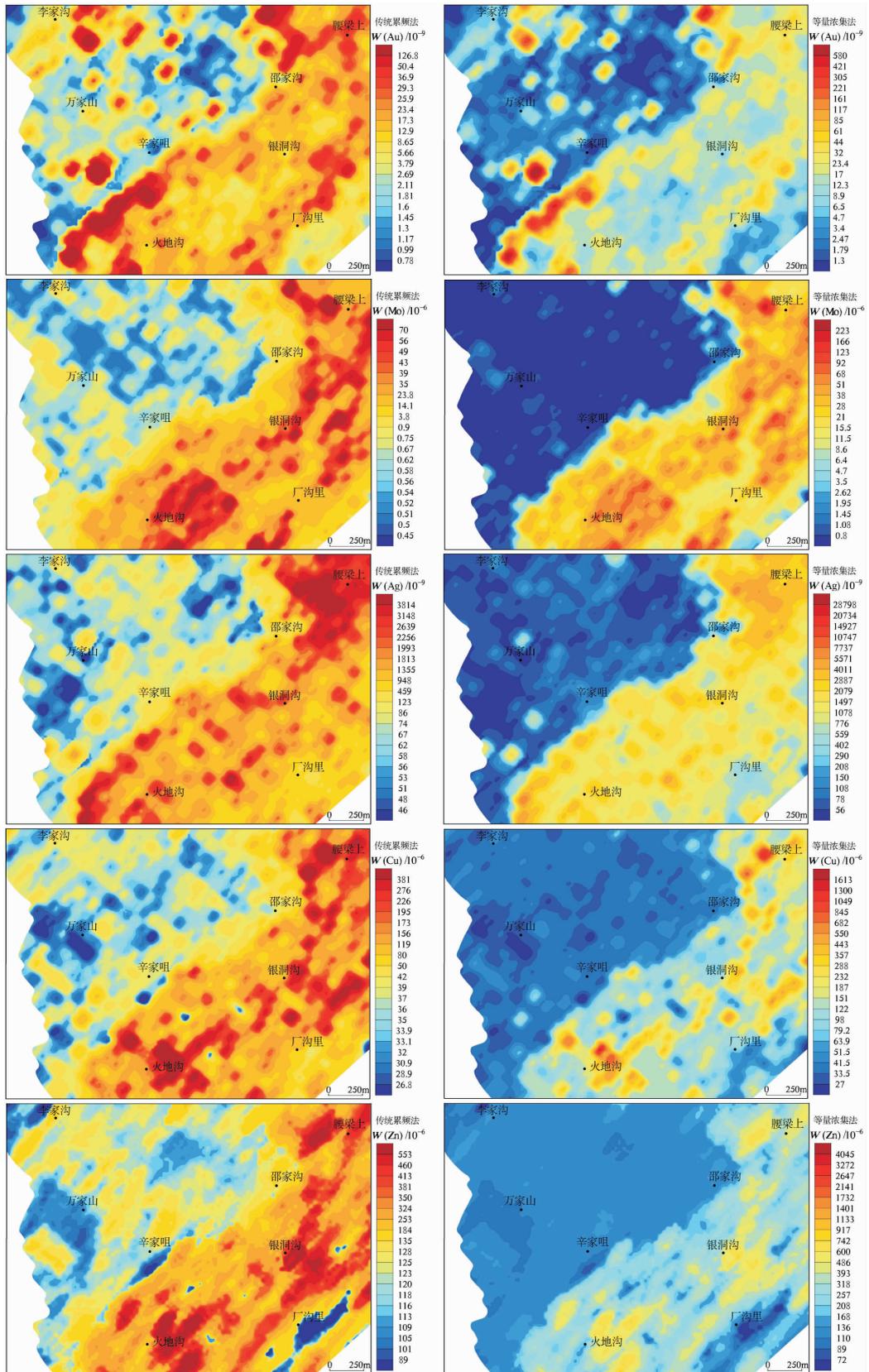
Fig. 3 Characteristics of manganese-gold polymetallic mineralization in Zhongba area

统累频法地球化学图中,地层界线虽有显示但很宽泛模糊,不利于使用地球化学成果指导厘定地层界线。

(2)为快速确定矿区主成矿元素、伴生元素及指示元素提供依据。从图 4 可知,中坝地区 Au、Mo、Ag 浓集程度较高,局部异常已经到达成矿区间,在区内也有相关矿脉、矿化地质体出现,表明 Au、Mo、Ag 为本区主成矿元素;Cu、Zn 整体呈中低背景分布,但在牛蹄塘组也有局部达到高富集区间,异常较好,与主成矿元素关系紧密,且局部地段有矿化出现,可作为本区重要的成矿伴生元素;As、Sb、Pb 在本区富集程度一般,异常仅在局部地区发育,尤其是 As、Sb 高值区与寒武系牛蹄塘组有关,该套地层富集了众多的金属元素,黑色页岩中普遍发育有微细黄铁矿颗粒;As、Sb、Pb 异常在辛家咀、腰梁上、厂沟里一带较为明显,与此地的 Au、Ag 等热液成矿活动有关;As、Sb、Pb 虽有富集但难以独立成矿,可作为本区重要指示元素;在矿区 W 平均值为 1.73

$\times 10^{-6}$,接近地壳丰度,变化系数仅为 0.61,在该区无明显分异,从等量浓集地球化学图可知,其主体为背景分布特征,异常稀少,在该区无明显找矿意义。

(3)能直观反映元素的绝对含量,各元素间相同地球化学分级具有同等的浓集程度,具有可对比性。在志留系千枚岩中矿区所有元素分布多在 $C_0 \sim C_{15}$ 级,呈背景分布特征,尤其是 Mo、Ag、Cu、Zn、Sb、W 等元素含量较低,接近地壳丰度,反映了该区志留纪滨海相碎屑沉积的地球化学特征。从图 4 可知,各元素在志留系中整体浓集程度排序为:As>Pb>Zn>Sb>Au>Cu>Ag>W>Mo。寒武系牛蹄塘组是一套次深海-深海相沉积的黑色岩系,其形成的特殊地质时代与复杂的物质来源决定了该地层具有与众不同的地球化学属性(范德廉等,2004)。本区牛蹄塘组中除 Pb、W 无富集外,其他元素均有较好的富集,多集中在 $C_{30} \sim C_{45}$ 级;Mo、Ag 富集程度更高,在 $C_{50} \sim C_{75}$ 。从图 4 可知,各元素在寒武系中整体浓集程度排序为:Mo>Ag>Au>Cu>Sb>As>



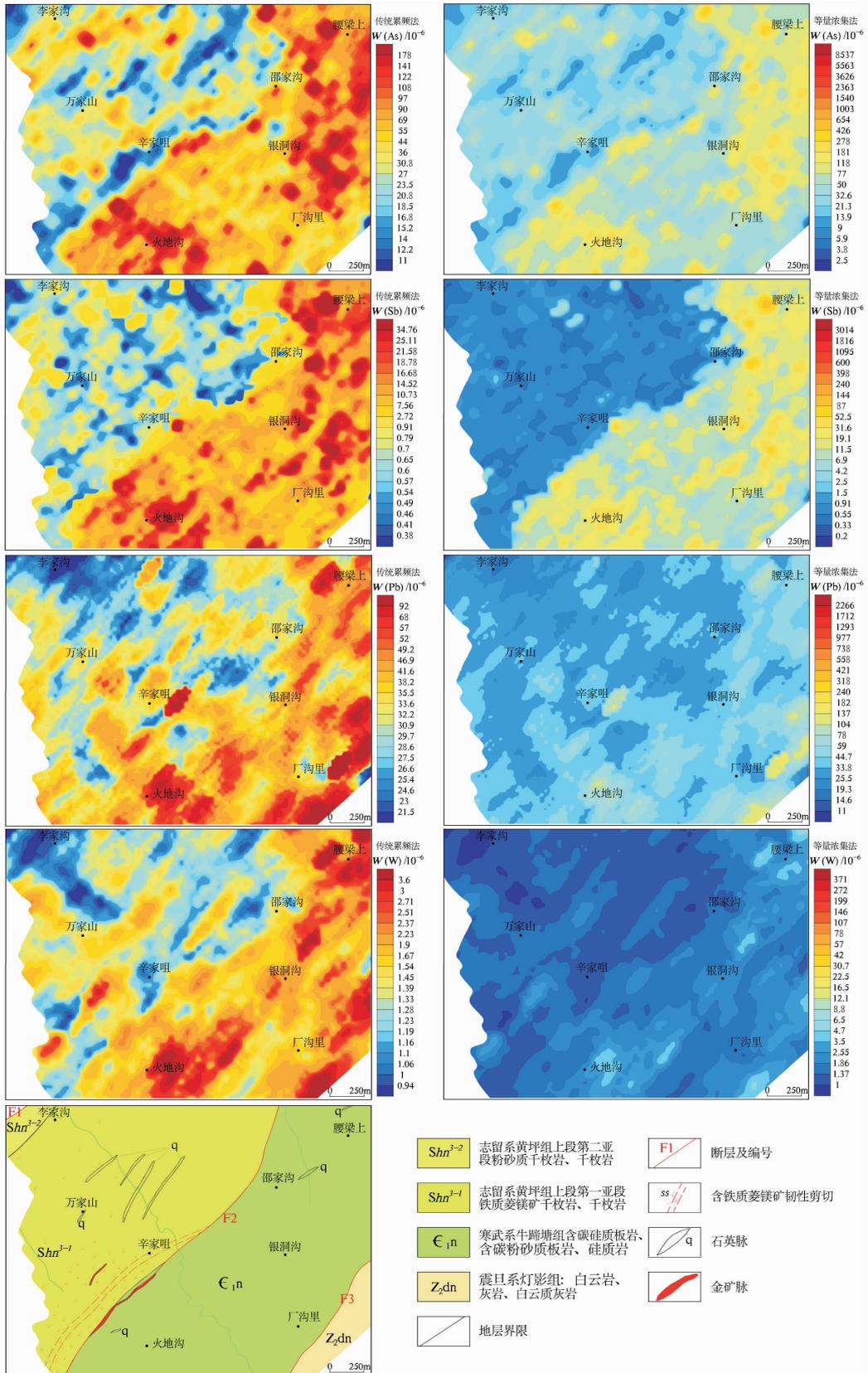


图 4 中坝矿区累积频法与等量浓集法地球化学图

Fig. 4 Geochemical maps in accumulative-frequency method and equivalent-concentrating method

表2 中坝矿区元素等量浓集分级方案表

Tab. 2 The equivalent-concentrating classifications scheme in Zhongba mining area

元素	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	As	Sb	W	Mo		
浓集系数 K	615	714	74	273	69	5 240	25 000	507	375		
等量浓集分级系数 a	1.066	1.068	1.044	1.058	1.043	1.089	1.107	1.064	1.061		
等量浓集分级含量	C_0 克拉克值	1.30	56	27	11	72	2.5	0.20	1.00	0.80	
	C_5	1.79	78	33.5	14.6	89	3.8	0.33	1.37	1.08	
	背景区	C_{10}	2.47	108	41.5	19.3	110	5.9	0.55	1.86	1.45
		C_{15}	3.4	150	51.5	25.5	136	9.0	0.91	2.55	1.95
		C_{20}	4.7	208	64	33.8	168	13.9	1.5	3.5	2.62
		C_{25}	6.5	290	79	44.7	208	21.3	2.5	4.7	3.5
		C_{30}	8.9	402	98	59	257	32.6	4.2	6.5	4.7
	富集区	C_{35}	12.3	559	122	78	318	50	6.9	8.8	6.4
		C_{40}	17.0	776	151	104	393	77	11.5	12.1	8.6
		C_{45}	23.4	1 078	187	137	486	118	19.1	16.5	11.5
		C_{50}	32	1 497	232	182	600	181	31.6	22.5	15.5
		C_{55}	44	2 079	288	240	742	278	52.5	30.7	21
	高富集区	C_{60}	61	2 887	357	318	917	426	87	42	28
		C_{65}	85	4 011	443	421	1 133	654	144	57	38
		C_{70}	117	5 571	550	558	1 401	1 003	240	78	51
		C_{75}	161	7 737	682	738	1 732	1 540	398	107	68
		C_{80}	221	10 747	845	977	2 141	2 363	660	146	92
成矿区	C_{85}	305	14 927	1 049	1 293	2 647	3 626	1 095	199	123	
	C_{90}	421	20 734	1 300	1 712	3 272	5 563	1 816	272	166	
	C_{95}	580	28 798	1 613	2 266	4 045	8 537	3 014	371	223	
	C_{100} 边界品位	800	40 000	2 000	3 000	5 000	13 100	5 000	507	300	

注:①等量浓集倍数 $n=100$;②Au、Ag 单位为 10^{-9} ,其他为 10^{-6} ;③克拉克值据 Rudnick R L, et al. 2003;边界品位据中华人民共和国地质矿产行业标准 DZ/T 0205-2020、DZ/T 0214-2020、DZ/T 0201-2020。

$Zn > Pb > W$ 。中坝矿区富集程度大于 C_{75} 级以上的元素主要为 Au,其次为 Mo、Cu。Au 异常主要分布在矿区辛家咀一带,为矿致异常,通过异常检查和工程验证发现了辛家咀金矿;Mo、Cu 在局部也有成矿可能。

3.3 中坝矿区元素等量浓集分级异常

3.3.1 传统异常划分

地球化学异常划分主要有均值方差法和累积频率法 2 种。均值方差法是最常用的化探异常划分方案,是以化探数据符合正态或对数正态分布为基础,用平均值与 3 倍标准离差之和进行迭代循环剔除离群数据,直至无数据可剔除为止,用剔除后剩余的数

据集的平均值与 2 倍(或 1.65 倍)标准离差之和作为异常下限,该方法圈定的异常与数据分布形态关系很大,而与数据整体含量高低无关,有一定局限性,容易圈出过大的异常,或圈不出异常,完全取决于数据分布特征。累积频率法是以假设研究区存在一定比例异常为前提,按累积频率的 85%、92%、98% 对应的含量(或以累积频率 85% 对应含量的 1、2、4 倍)划定元素外、中、内带异常。该方法确定的异常下限与元素整体含量高低无关,不管元素有无成矿可能,都能按比例圈出异常(向运川等,2018)。

3.3.2 等量浓集异常划分

中坝矿区 Au 为主要成矿元素,Sb 为金矿伴生

元素,Cu、Mo 在局部亦有矿化富集可能。因此,选择 Au、Sb、Cu、Mo 异常来研究该区成矿潜力,确定找矿有利地段。矿区各地层元素背景差异较大,因

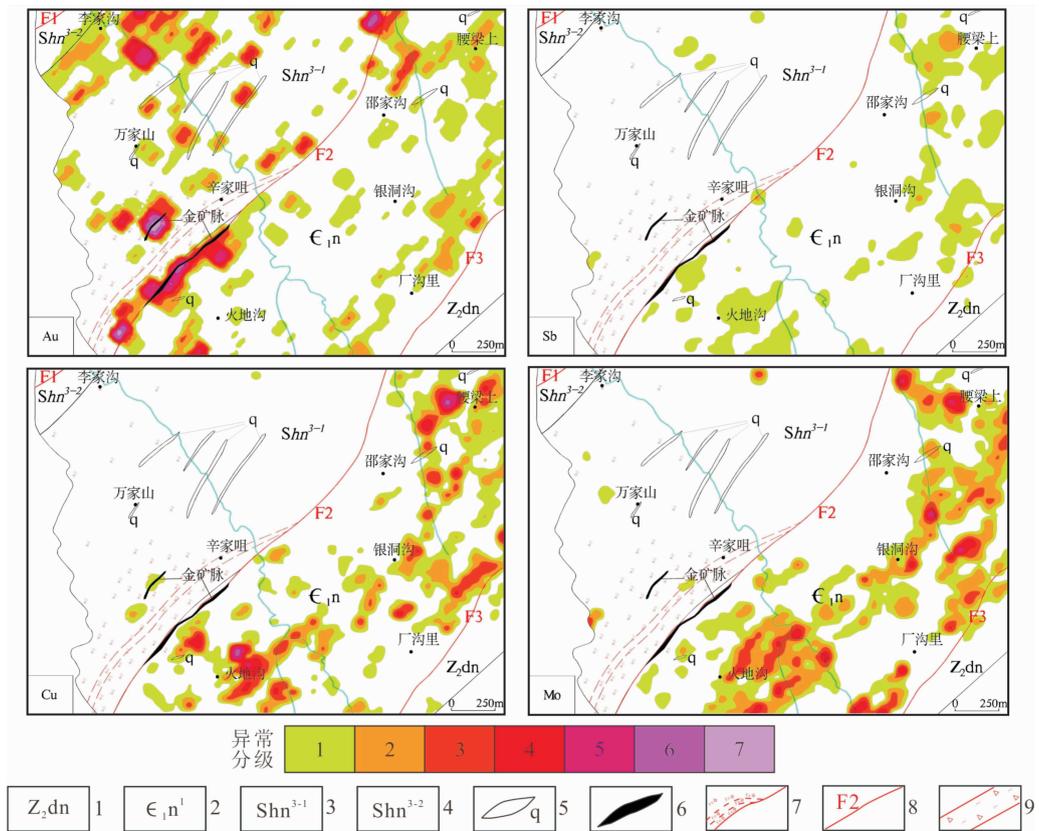
此将该区划分为 2 大地质单元,按照等量浓集异常划分办法,分别统计异常值(表 3)并绘制各分区元素异常图(图 5)。

表 3 中坝矿区等量浓集 7 级异常分级表

Tab. 3 The 7 equivalent-concentrating anomaly levels in Zhongba mining area

元素	Au		Sb		Cu		Mo		
	志留系	寒武系	志留系	寒武系	志留系	寒武系	志留系	寒武系	
地质单元									
异常分级	C _b	1.7	15.1	0.66	11.6	36.1	116.4	0.61	26
	T ₁	3.94	21.4	2.03	19.5	61.6	152.2	1.54	30
	T ₂	9.57	39.2	7.47	49.1	110	234	3.71	44
	T ₃	23.2	71.6	27.5	124	197	359	8.93	65
	T ₄	56.2	131	101	312	351	552	21.5	95
	T ₅	136	239	370	787	627	848	51.7	139
	T ₆	330	438	1 361	1 984	1 120	1 302	124.6	204
	T ₇	800	800	5 000	5 000	2 000	2 000	300	300

注:①C_b为元素背景值,T_i为第 i 级异常值;②Au 单位为 10⁻⁹,其他为 10⁻⁶。



- 震旦系灯影组白云岩、灰岩、白云质灰岩;
- 下寒武统牛蹄塘组含碳硅质板岩、含碳粉砂质板岩、硅质岩;
- 志留系黄坪组上段第一亚段铁质菱镁矿千枚岩、千枚岩;
- 志留系黄坪组上段第二亚段粉砂质千枚岩、千枚岩;
- 石英脉;
- 金矿脉;
- 铁质菱镁矿化蚀变带;
- 断层及编号;
- 燕子砭-金山寺断裂带

图 5 中坝矿区元素等量浓集异常图

Fig. 5 The equivalent - concentrating anomaly maps of Zhongba mining area

Au异常在中坝矿区分布广泛,大致分为4个集中区域:①位于矿区西南,以辛家咀一带最为突出,异常呈北东向条带状分布,长约1 km,异常浓集中心明显,最高为7级;异常查证发现了产于北东向脆韧性剪切带中的辛家咀金矿;剪切带位于志留系黄坪组与寒武系牛蹄塘组接触带附近,探槽控制长560 m的金矿脉1条,主要为与剪切带有关的石英脉型、构造蚀变岩型矿石;探槽Au品位为 $0.64 \times 10^{-6} \sim 15.4 \times 10^{-6}$,矿脉向深部延伸稳定,施工钻孔见到平均厚度3.85 m、平均品位为 2.86×10^{-6} 的金矿体;辛家咀金矿初步探获金推断资源量3.6 t;在辛家咀西300 m处,发育一处团块状7级Au异常,是由前人发现的金矿脉所引起,有民采矿硐1处。②在矿区西北李家沟一带Au异常较为突出,Au异常面积大且最高可达5级,异常形态为北东向双条带。③位于矿区东北角邵家沟-腰梁上一带,异常总体呈“X”型状,异常中心具呈北东向雁列状排布的特征,异常最高达7级;在7级异常区查证发现金矿点1处,探槽见Au平均品位为 6.3×10^{-6} ,最高品位为 10.7×10^{-6} 。④在矿区东南厂沟里一带,Au异常沿寒武系底部呈北东向发育,异常强度低,最高为3级;在火地沟西南、万家山东北一带也有少量团块状Au异常分布,异常强度为2~4级不等。

Sb异常受地层控制明显,主要位于牛蹄塘组中,异常最高为2级,表明Sb在该区独立成矿可能性较低;Sb异常主要分布在辛家咀、火地沟、腰梁上、厂沟里一带;Sb在辛家咀零星分布,异常较弱,在腰梁上、厂沟里一带Sb与Au异常套合较好,Sb为Au的重要伴生元素。

Cu、Mo异常分布相似,在志留系黄坪组中,均为低背景特征,无明显异常。在寒武系牛蹄塘组中异常较为发育,整体呈北东向条带状。Cu异常最高6级,Mo异常最高5级。Cu、Mo异常在火地沟、腰梁上2个区域最为突出,在银洞沟一带也有高强异常出现。Cu、Mo异常在牛蹄塘组中呈北东向条带状断续分布,推测是与该套黑色岩系中的富锰、钼、锌、铜等多金属矿化层有关。

通过中坝矿区等量浓集7级异常划分及初步找矿成果来看,Au为本区主成矿元素,Sb为其伴生元素。在Au等量浓集异常达到5级以上时,具有极高成矿可能。如在矿区西南发现了辛家咀金矿,在邵家沟北发现金矿点1处,由此推断,在李家沟等Au异常突出地带也有极大的金成矿潜力。矿区

Cu、Mo异常突出,也有一定成矿潜力;在中坝地区牛蹄塘组黑色岩系中已经发现了多处银、铜、锰等金属矿化,该地层显著富集众多成矿元素,可为区域成矿提供巨量的矿质来源,是重要的矿源层。从中坝矿区应用效果来看,依据等量浓集原理划分元素异常的办法是可行的,圈定的异常形态与强度均与实际地质情况吻合,能客观反映该区元素分布、分配及富集离散特征,充分发挥了化探在找矿中的先导作用。等量浓集异常与传统化探异常的不同在于该方法充分考虑到元素的背景含量及其与矿体边界品位的关系,划分的异常更有实践指导意义,避免了传统方法受限于数据分布形态或强行按一定比例划分异常时人为因素影响过大的弊病。等量浓集异常在表现异常强度方面也比传统方法更为直观明了。

等量浓集概念的提出为研究元素分配规律提供了较大便利,可直观明了地展现出元素的空间分布规律与富集贫化特征,有较好的应用空间。应用等量浓集原理时,使用岩石或土壤样品数据更为合适,在使用水系沉积物样品数据时,要充分考虑到各元素在表生环境下的贫化富集所带来的影响。

4 结论

(1)元素等量浓集概念是为研究元素在克拉克值与矿体边界之间的分布、分配规律而提出的,为定量评价和对比元素富集离散特征提供了新的思路与办法。

(2)通过中坝矿区土壤元素等量浓集直方图、等量浓集地球化学图、等量浓集7级异常划分特征可知,该区元素分布受地层、构造成矿活动控制明显;Au、Ag、Mo、Cu等元素浓集程度高,有较大找矿潜力。通过异常检查发现了辛家咀金矿,初步探获金推断资源量3.6 t,取得了良好的找矿效果;Ag、Mo、Cu等异常与寒武系牛蹄塘组黑色岩系关系紧密。

致谢:西安矿产资源调查中心高永宝研究员、西安地质调查中心李宗会高工和审稿专家对本文提出了许多宝贵的修改意见,在此表示诚挚的谢意!

参考文献(References):

- 蒋敬业,程建萍,祁士华,等.应用地球化学[M].武汉:中国地质大学出版社,2006:145-241.
JIANG Jingye, CHENG Jianping, QI Shihua, et al. Applied

- Geochemistry[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2006:145-241.
- 宋贺民,张辉,顾松松,等. 新疆哈拉奇地区水系沉积物地球化学特征及找矿方向[J]. 地质通报,2014,33(01):71-78.
- SONG Hemin, ZHANG Hui, GU Songsong, et al. Stream sediment geochemical characteristics and prospecting direction in Karaqi area of Xinjiang[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(1):71-78.
- 杜保峰,杨长青,柴建玉,等. 水系沉积物测量在西藏春哲地区找矿效果[J]. 中国地质,2018,45(3):604-616.
- DU Baofeng, YANG Changqing, CHAI Jianyu, et al. The effect of stream sediment survey for prospecting in Chunzhe area, Tibet[J]. Geology in China, 2018, 45(3):604-616.
- 侯长才,李玉莲,李永太,等. 青海东昆仑五龙沟地区化探次生晕觅金效果探讨[J]. 西北地质,2019,52(1):183-194.
- HOU Changcai, LI Yulian, LI Yongtai, et al. The Effect of Applying Geochemical Exploration Secondary Halo Anomalies to Prospect Gold Deposits in Wulonggou Area, East Kunlun, Qinghai Province [J]. Northwestern Geology, 2019, 52(1):183-194.
- 段吉学,刘江. 综合物化探在内蒙古石多金属矿普查中的应用研究[J]. 西北地质,2019,52(3):265-274.
- DUAN Jixue, LIU Jiang. Application of Comprehensive Physical and Chemical Exploration Method for Prospecting Fluorite Polymetallic Deposit in Inner Mongolia [J]. Northwestern Geology,2019,52(3):265-274.
- 张德会. 成矿作用地球化学[M].北京:地质出版社,2015:11-52.
- ZHANG Dehui. Geochemistry of Ore-Forming Processes[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015: 11-52.
- 吴锡生. 化探数据处理方法[M].北京:地质出版社,1993:18-36.
- WU Xisheng. Geochemical data processing methods [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 18-36.
- 韩东显,龚庆杰,向运川. 区域化探数据处理的几种分形方法[J]. 地质通报,2004, 23(7):714-719.
- HAN Dongyu, GONG Qingjie, XIANG Yunchuan. Some new fractal methods for regional geochemical survey data processing [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(7):714-719.
- 李明喜,庞存廉,于兆云,等. 青海省1:50000地球化学水系沉积物测量工作细则(试行)[S]. 地矿部青海地质矿产勘查开发局,1999,45-51.
- LI Mingxi, PANG Cunlian, YU Zhaoyun, et al. Detailed rules for 1:50000 geochemical stream sediment survey in Qinghai province (trial implementation) [S]. Qinghai Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development GMM,1999:45-51.
- 向运川,牟绪赞,任天祥,等. 全国矿产资源潜力评价化探资料应用研究[M].北京:地质出版社,2018:198-203.
- XIANG Yunchuan, MOU Xuzan, REN Tianxiang, et al. Application of geochemical data in the evaluation of mineral resources potential in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018: 198-203.
- 马润华,伊鹏英,王振东,等. 陕西省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2007:1-7.
- MA Runhua, YI Kunying, WANG Zhendong, et al. Stratigraphy(Lithostratic) of Shaanxi Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2007: 1-7.
- 朱裕生,肖克炎,宋国耀,等. 中国主要成矿区(带)成矿地质特征及矿床成矿谱系[M].北京:地质出版社,2007:163-178.
- ZHU Yusheng, XIAO Keyan, SONG Guoyao, et al. Geological Characteristics and Deposit Metallogenic Pedigree of Major Metallogenic Areas (bands) in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007:163-178.
- 李智武,冉波,肖斌,等. 四川盆地北缘震旦纪—早寒武世隆坳格局及其油气勘探意义[J]. 地学前缘,2019,26(1):59-85.
- LI Zhiwu, RAN Bo, XIAO Bin, et al. Sinian to Early Cambrian uplift-depression framework along the northern margin of the Sichuan Basin, central China and its implications for hydrocarbon exploration [J]. Earth Science Frontiers,2019,26(1): 059-085.
- 钟俊. 四川广元太阳坪金矿床地质特征及成因研究[D]. 成都:西南科技大学硕士学位论文,2019:10-16.
- ZHONG Jun. Geological Characteristics and Genesis of Taiyangping Gold Deposit, Sichuan Province [D]. Chengdu:Southwest University of Science and Technology Master Degree Thesis, 2019: 10-16.
- 孙克俭,孙斌. 1:20万略阳幅、碧口幅地球化学图说明书[R]. 陕西省地质矿产局物化探队化探分队,1989.
- 樊战军. 陕西省勉略宁地区南部1/5万水系沉积物测量报告[R]. 中国人民武装警察部队黄金第十四支队,1999.
- 中华人民共和国地质矿产行业标准. 矿产地质勘查规范 岩金矿:DZ/T 0205-2020[S].
- 中华人民共和国地质矿产行业标准. 矿产地质勘查规范 铜、铅、锌、银、镍、钼矿:DZ/T 0214-2020[S].
- 中华人民共和国地质矿产行业标准. 矿产地质勘查规范 钨、锡、汞、锑矿:DZ/T 0201-2020 [S].
- 范德廉,张焘,叶杰,等. 中国的黑色岩系及其有关矿床[M].北京:科学出版社,2004:1-48.
- FAN Delian, ZHANG Tao, YE Jie, et al. Black rock series in China and related deposits [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-48.
- Gong Qingjie, Li Jinzhe, Xiang Yunchuan, et al. Determination and classification of geochemical anomalies based on backgrounds and cutoff grades of trace elements: A case study in South Nanling Range, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, 194: 44-51.
- Rudnick R L, Gao S. Composition of the Continental Crust. Treatise on Geochemistry [M]. Oxford: Elsevier, 2003, 3(01): 1-64.