第 56 卷 第 6 期 2023 年(总 232 期)

NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 56 No. 6 2023(Sum232)

DOI: 10.12401/j.nwg.2023106

甘肃省礼县三峪地区土壤地球化学特征及找矿预测

刘永胜^{1,2},罗先熔^{1,*},曹佰迪³,刘秀娟⁴,刘攀峰¹,梁鸣¹,郭家欣⁵,杨青松¹,石佳磊¹

(1. 桂林理工大学地球科学学院,广西桂林 541004; 2. 甘肃省有色金属地质勘查局天水矿产勘查院,甘肃天水 741024;
3. 中国地质调查局西安地质调查中心,陕西西安 710119; 4. 华北地质勘查局五一四地质大队,河北承德 067000;
5. 河南省地质局矿产资源勘查中心,河南郑州 450000)

摘 要: 三峪地区位于甘肃崖湾-大桥金锑矿带,属于国家级整装勘查内,具有金、锑、铜等多金 属成矿条件及找矿潜力。为进一步提高地质找矿工作,在研究区开展了1:2.5万土壤地球化学 测量,以Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Ni、Sb、Bi、Hg等9种元素原始数据为基础,运用分形特征及元素的变 异系数、浓度系数等方法,对9种元素基础数据进行了统计,并分析了元素空间富集状态及分布 趋势。结果显示,Pb、Zn、Sb和Au具有一定的找矿指标,利用 SPSS 25 对9种元素进行聚类及因 子分析,共划分出 F1(Ag-Pb-Zn-Sb)、F2(Au-Cu-Ni-Bi)、F3(Hg)3种组合元素,通过衬度异常法 得出元素组合异常下限,根据软件 Sufer 13 对组合元素做出因子得分异常图,共圈定出4个找矿 远景区,为下一步开展地质找矿、缩小远景区提供依据。

关键词:土壤地球化学;分形;异常衬度组合;找矿预测;三峪地区 中图分类号:P595 文献标志码:A 文章编号:1009-6248(2023)06-0340-12

Soil Geochemical Characteristics and Prospecting Prediction in Sanyu Area, Li County, Gansu Province

LIU Yongsheng^{1,2}, LUO Xianrong^{1,*}, CAO Baidi³, LIU Xiujuan⁴, LIU Panfeng¹, LIANG Ming¹, GUO Jiaxin⁵, YANG Qingsong¹, SHI Jialei¹

College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;
 Gansu Non–Ferrous Engineering Exploration & Research Institute, Tianshui 741024, Gansu, China;
 Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China;
 514 Brigade of North China Geological Exploration Bureau, Chengde 067000, Hebei, China;
 Mineral Resources Exploration Center, Zhengzhou Geological Bureau, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: Sanyu area is located in the Yawan–Daqiao gold–antimony ore belt of Gansu Province, which belongs to the national integrated exploration, and has the metallogenic conditions and prospecting potential of gold, antimony, copper and other polymetals. In order to further improve the geological prospecting work, 1 : 25 000 soil geochemical survey was carried out in the research area. Based on the original data of Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Ni, Sb, Bi and Hg elements, fractal characteristics, coefficient of variation, coefficient of concentration and oth-

收稿日期: 2022-06-18; 修回日期: 2023-04-10; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金"多孔覆盖层介质铜元素迁移机理研究"(42203067),国家重点研发计划项目"穿 透性地球化学勘查技术"(2016YFC0600603)资助。

作者简介:刘永胜(1986-), 男, 硕士, 主要从事地质勘查及勘查地球化学研究工作。E-mail: lys008@glut.edu.cn。

^{*} 通讯作者: 罗先熔(1953-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地球化学研究工作。E-mail: lxr811@glut.edu.cn。

er methods, The basic data of 9 elements were statistically analyzed, and the spatial enrichment status and distribution trend of elements were analyzed. The results showed that Pb, Zn, Sb and Au had certain prospecting indexes, SPSS 25 was used for clustering and factor analysis of 9 elements, and three combination elements were divided into F1 (Ag–Pb–Zn–Sb), F2 (Au–Cu–Ni–Bi) and F3 (Hg). The lower limit of element combination anomaly was obtained by contrast anomaly method, and according to software Sufer. The factor score anomaly map of 13 combination elements was made, and a total of 4 prospecting prospects were delineated, which provided a basis for further geological prospecting and reduction of prospective areas.

Keywords: soil geochemistry; fractal; abnormal combination; prospecting prediction; Sanyu region

研究区位于甘肃崖湾-大桥金锑矿带,属于国家 级整装勘查区,该勘查区具有金、锑、铜、砷、铁多金 属成矿条件及找矿潜力,是西秦岭地区主要的金矿 集中区,同时也是陕甘川"金三角"的重要组成部分 (彭素霞等,2007;张翔等,2009;孙则朋等,2016)。近 二三十年来,先后在该地区发现了具有工业价值的 大桥金矿、崖湾大型锑矿、坪定金砷矿、白草坝锑砷 矿、白崖沟锑金矿、甘江头金矿、河畔沟金锑矿、范 家坝铜矿、张家沟铅锌矿等大中型金、锑矿床(姜 寒冰等,2023),充分显示在该地区找矿潜力十分 优越。

土壤地球化学测量是通过采集地表风化疏松物 质下方的残积物样品,分析元素的含量与集中规律, 通过发现土壤中的异常,并进行找矿的一种勘查手法 (罗先熔等,2008)。作为勘查地球化学的勘查方法之 一,被常规运用于寻找不同类型矿床及矿产评价(谢 学锦,2002)。随着地表找矿难度的逐渐增大,尤其地 表覆盖层厚,基岩出露较少,水系不发育,地形条件差 等因素下,运用土壤地球化学测量来直观指示其与下 伏岩层矿化线索,对寻找隐伏矿体是一种更直观的找 矿方法(Cohen et al., 2010;李天虎等, 2022)。

研究区属于南北秦岭之间的高山丘陵区,地形陡 峻,切割强烈,森林覆盖区大,且第四系覆盖物厚,因 此选用土壤地球化学测量作为勘查区找矿方法。前 人先后在该区带做过相关地质调查工作(段晓华等, 2008;张鹤启等,2020;杨明莉等,2021),但对该地区 地球化学异常信息研究较少,区内开展的地质工作程 度较低。为了进一步加强在研究区地质调查工作,明 确地化异常和优选找矿远景区,对研究区开展了 1:2.5万土壤地球化学测量,运用分形及因子分析和 相关性分析等多元统计方法,确定研究区各元素之间 的时空分布,运用异常衬值,圈定异常远景区,为开展 下一步地质找矿工作,提供找矿依据。

1 成矿地质背景

甘肃崖湾-大桥地区金锑矿成矿带,位于秦岭-大 别新元古代—古生代造山带之白龙江隆起带与阿尼 玛卿裂陷沉积区东段(张家瑞等,2020)(图 1a),成矿 区带属夏河-崖湾印支期—燕山期金、锑、汞成矿带。 区域内出露地层广泛,主要为泥盆系、石炭系、二叠 系、三叠系、侏罗系及古近系和第四系。其中,三叠 系最为发育,为复理石建造;泥盆系、石炭系及二叠系 以浅海相碳酸盐建造为主;古近系为红色砂砾岩、砂 岩、粉砂岩。

泥盆系主要由泥盆统吴家山组(D₁w²):碳质千枚 岩、大理岩、结晶灰岩及白云岩、变砂砾岩。中泥盆 统西汉水组(D_x): 绢云母方解石千枚岩、粉砂质条带 千枚岩及钙质细砂岩夹中厚层生物碎屑灰岩、薄-厚 层粉晶灰岩、生物碎屑灰岩夹方解石千枚岩、钙质板 岩、棕褐色砂岩、砂板岩。安家岔组(D2a)、洞山组 (D,d): 绢云母千枚岩、粉砂质千枚岩夹粉晶灰岩、生 物碎屑灰岩、大理岩、白云岩等组成。石炭系主要由 下石炭统(C₁): 灰色中厚层灰岩灰红色块状灰岩、板 岩、粉砂岩、页岩、石英砂岩。中上石炭统(C₂₋₃):灰、 灰白色中厚层致密纯灰岩组成。二叠系主要由大关 山群(P₁dg): 灰—暗灰色中厚层灰岩组成。三叠系主 要由下三叠统隆务河组(T₁l)、中三叠统古浪堤组 (T₂g):砂岩、灰黑色板岩、灰色灰岩互层、砾岩、泥岩 组成、该层已发现崖湾锑矿、大桥金矿、上坝铜矿等 矿(床)点分布。侏罗系为中下侏罗统(J12):分别不整 合于中上石炭统、三叠系之上。主要为沉积岩系组成。 古近系为一套陆相红色碎屑岩沉积。岩性以红色砾 岩为主,夹少量砂岩、粉砂岩和砂质黏土。第四系较 发育,主要为冲、残、坡积物。

区内岩浆岩较为发育,主要出露印支期赵家沟石



 1.第四系; 2.古近系; 3.侏罗系; 4.三叠系中统; 5.三叠系中统; 6.三叠系下统; 7.二叠系; 8.石炭系中上统; 9.石炭 系下统; 10、11.泥盆系洞山组; 12.泥盆系西汉水组; 13.泥盆系安家岔组; 14.泥盆系吴家山组; 15.印支期花岗闪 长岩; 16.印支期玻基玄武岩; 17.印支期石英闪长岩; 18.石英斑岩; 19.粗面岩; 20.实测地质界线; 21.推测地质界 线; 22.实测不整合界线; 23.实测断层; 24.推断性质不明断层; 25.河流; 26.金矿点; 27.金、锑矿点; 28.金、铜、 铁矿点; 29.铅、锌、铜矿点; 30.铜矿点; 31.锑矿点; 32.铁矿点; 33.锑、雄黄矿点; 34.研究区

图 1 研究区大地构造位置示意图(a)(据张家瑞等,2020修改)及区域地质矿产图(b)(据刘开君等,2016修改)

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the geotectonic location in the study area and (b) regional geology and mineral resources map

英闪长岩体(δO_5^2)、申家庄黑云母花岗闪长岩($\gamma \delta_5^1$)、 石英斑岩($\lambda \pi$)、玻基玄武岩(β_5^2)等岩脉。 该区位于秦岭东西构造带的西延部分与武都山 子型构造西翼复合部位,地质构造极其复杂。主要构 造线为北西向。褶皱受晚期断层破坏明显。褶皱构 造发育,构造线呈 NW 向,向东转为 EW 向。最大的 褶皱构造为白龙江复背斜、石家河复式向斜。区域内 断裂构造主要有 NW、NE、近 SN 向 3 组断裂,其中 NW 向断层最为发育。

区带上多金属矿床(点)及异常星罗棋布、成群成 带分布,周边有 Au、Cu、Sb、Fe 矿(化)点 20 余处 (图 1b)。研究区出露地层主要为下三叠统隆务河组 (T₁*l*),主要为灰绿-灰色砂岩、灰黑色板岩、灰色灰岩 互层,含砾灰岩夹灰岩透镜体,尚夹流纹岩、英安岩及 火山碎屑岩。三叠系为寻找锑金矿的重点层位,该层 为区域上主要的含矿层位,崖湾大型锑矿就赋存与此 层中(刘开君,2016;谢世强,2018;周叶泽,2020)。

2 地球化学元素的采集与分析

研究区工作方法主要遵循《土壤地球化学测量 规程》(DZ/T0145-2017)规范,根据研究区地形地质 条件情况,开展1:2.5万土壤地球化学测量,按 250 m×50 m 网度布设土壤地球化学采样点, 通过野 外实际踏勘情况,来布设测线,测线应垂直或大致 垂直于岩层走向及构造线方向,方位40°,并在其测 线上按照50m的间距来布设测点。因此样品采集 B层位一般为距地表15~50 cm,但研究区森林范围 大且覆盖较厚,为尽量避开其附近的污染源,采样 深度一般多为30 cm 以下,有时可能40~50 cm,采 如遇于大于1m的覆层时,可将采样点移动至覆盖 厚度较小的地段,一般移动距离不大于 50 cm, 避免 采集腐植物(A层)。根据该研究区及其外围以往 工作经验,取100网目以下粒度为采集对象,样品 重量为150~200g。要严格按照规范,对其采样点 及周围地质特征做好详细的记录,要求保证采样物 质一致,避免岩屑样品混杂现象。

本次野外工作共采集到土壤样品 1 200 件,样 品分析由甘肃省有色金属地质勘查局天水矿产勘 查院实验室来完成,分析元素为 Au、Ag、Cu、Pb、 Zn、Ni、Sb、Bi、Hg 共 9 种元素。其中, Au运用石墨 炉原子吸收法测定, Ag 采用原子吸收测定, Cu、Pb 和 Zn 采用 X 射线荧光测定, As、Hg、Sb、Bi 和 Sn 采 用电感耦合等离子体发射光谱测定,各样品分析元 素的检测率均大于 95%。

3 分形特征

元素在空间的结构及各方向的变化趋势,具有明显的空间属性即分形特征(成秋明,2012)。分形主要表现为局部与整体具有相似性(申维,2007;龚晶晶等,2020),由于成矿过程表现为复杂的多期次元素叠加,往往表现出元素富集或亏损,使地球化学背景值和异常形成各自独立的幂指数关系,服从多重分形规律(Wang et al., 2017; Liu et al., 2020)。本次对研究区采用含量-面积求和法模型,其特点主要是元素含量 r 和与该含量等值线所圈定之和 N(r)服从幂律关系。

$$N_{(r)} = Cr^{-D} \qquad r > 0 \tag{1}$$

将公式(1)两边取对数,得到一元性回归方程,即 lgN(r)=-Dlgr+lgC,通过在对对数图及散点图中,用 最小平方法(最小二乘法)直线拟合,根据拟合直线斜 率的绝对值求出分维数 D。

通过对研究区 9 种元素进行统计分形,得到以横 坐标为元素含量和以纵坐标为和数之间的对数散点 图(图 2),根据图 2 可以看到,元素含量分布体现在空 间中有不同的无标度区域,且有不同的直线斜率,及 分维数 D,为使更加合理确定分维数,即在区间内对 最小平方法(最小二乘法)进行回归,对通过对各个分 区间的拟合直线与原始值之间的剩余平和 E_i(i=1,2) 在两区间总和最小(张焱等,2011;施海鹏等,2015;赵 欣怡等,2020),主要检验公式如下。

$$E = E_1 + E_2 = \sum_{i=1}^{i_0} \left[\lg N(r_i) + D_1 \lg r_i - \lg C_1 \right]^2 + \sum_{i=i_0+1}^{i_0} \left[\lg N(r_i) + D_2 \lg r_i - \lg C_2 \right]^2$$
(2)

式中: r_i 拟合直线交点; D₁、D₂ 为拟合直线斜率及 分维数。

从图 2 可知, 9 种元素拟合出不同的直线方程, 且 呈先慢后快的趋势, 表现为右倾, 代表了元素在土壤 中的具有多重分形特点, *D*₁ 表示为拟合直线较平缓, 都近似成水平, 且 *D*₁ 值基本较小, 表现为元素含量的 背景分布; *D*₂ 表示拟合直线倾斜, 且斜率大小不均一, 反映元素不均一, 可能由元素在空间表示有元素异常 变化引起, 拟合值越小, 元素引起异常特征显著, 富集 成矿规律越明显。面积-求和法确定土壤化学元素含 量对研究区分组界线, 根据对各元素直线方程回归拟 合, 且通过显著性检验(申维等, 2007)。将研究区 9





种元素以 D 等于 4 为界, 可划分为 2 类: ①Au、Ag、Zn、 Sb 元素斜率较小, 表明元素其成矿可能潜力大, 与研 究区三叠系成矿特征相吻合, 可作为研究区主要关注 对象。②Cu、Pb、Ni、Bi、Hg 元素斜率较大, 异常值可 能与区域地层有关, 对比研究区地层分布, 但高值点 较少, 元素密集程度较低, 其成矿的可能性较小。

4 地球化学特征

4.1 土壤地球化学元素参数统计

①依据研究区9种元素的原始数据分析表,对元素的最大值、算术平均值、标准离差、变异系数等地球化学参数来分析和阐明1:2.5万土壤地球化学元

素的分布规律及特征。②通过对原始数据处理,按照 X+3S和X-3S的标准,循环剔除其中的离群数据(黄 学强等,2013)。③求得剔除后的各元素算术平均值、 标准离差、变异系数等地球化学参数(表1)。从表1 可知,原始Sb变异系数等地球化学参数(表1)。从表1 可知,原始Sb变异系数大于0.5,表明元素离散程度 高,Au、Ag、Bi和Zn元素变异系数相当,元素离散程 度中等,Cu、Pb、Ni和Hg变异系数和当,元素离散程 度低。浓度系数主要用来描述其元素在化学异常中 所反映的富集程度,为元素算术平均值与陇南地区背 景值比值得到(黎彤,1976;刘建宏等,2015;李超等, 2020)。结果显示,Sb(2.20)、Pb(1.69)、Ni(1.52)的浓 度系数大于1.5,说明在该区元素分布不均匀,有强的 富集程度,元素的迁移程度明显。Cu(1.23)、Zn(1.29)、

Tab. 1 Statistical characteristics of geochemical element content parameters in Sanyu area, Lixian County, Gansu Province

元素	样品数目	最大值	算术	标准	变异系数	浓度	陇南地区	算术	标准	变异系数
	(件)		平均值	离差	CV_1	系数	背景值	平均值	离差	CV_2
Au	1 200	6.4	1.6	0.7	0.46	1.01	1.58	1.58	0.61	0.39
Ag	1 200	0.23	0.04	0.02	0.44	/	71.14	0.04	0.02	0.39
Cu	1 200	65	30.5	5.1	0.17	1.23	24.7	30.24	4.31	0.15
Pb	1 200	24	36.8	6	0.16	1.69	21.81	35.75	3.31	0.1
Zn	1 200	700	95.1	28.8	0.3	1.29	73.89	90.92	12.56	0.16
Ni	1 200	201	46	9.8	0.21	1.52	30.25	44.85	4.82	0.14
Sb	1 200	23.11	1.8	0.98	0.55	2.2	0.82	1.57	0.26	0.23
Bi	1 200	3.37	0.43	0.16	0.38	1.3	0.33	0.42	0.11	0.29
Hg	1 200	21	14	3	0.19	0.52	26.75	14.46	2.74	0.19

注: Au、Ag含量为10°; 其他元素含量为10°; 变异系数=标准离差/平均值; 浓度系数=平均值/陇 南地区背景值;"/"表示数值低。

Bi(1.30)元素浓度系数相差不大;但有较高的富集程 度和明显的富集特征,有形成地球化学异常的可能。 Hg 的浓度系数相对较低。研究区 Au、Sb、Pb、Ni、Cu、 Zn、Bi元素呈富集状态,易形成地球化学异常。而 Hg元素表明元素在研究区内分布较均匀,且在局部 地段元素富集的趋势较小,则不易于形成地球化学异 常(施海鹏等, 2015; 王发明等, 2015; 王会敏等, 2016)。

4.2 研究区元素组合分析

4.2.1 R型聚类分析

R型聚类分析主要对各个元素之间相关性大小 按其分类,及各元素和元素之间的亲疏程度。便于了 解在地质条件各成矿作用下于元素间的各种成因聚 类(袁和等, 2017;何旺等, 2019;苏艺怀等, 2021)。得 出R型聚类分析谱系图(图 3),当距离系数R取 0.3时,将研究区9种元素归为4类组合:第一类为 Ag-Pb-Zn-Sb元素,主要为中低温成矿元素;第二类 为Bi-Ni-Cu元素,主要为中高温成矿元素;第三类 为Au元素,单独元素,代表低温元素;第四类为Hg元 素,为低温元素。

4.2.2 因子分析

为更深入清晰刻画元素在空间共生组合之间的 关系,在上述R型聚类分析的基础上,运用其因子分 析来研究元素共生组合之间的关联性。因子分析是 把多个变量的原始数据进行整理、归纳、提炼,通过 对数据降维方法,从变量中提取公用因子,来分析研 究各元素地质成因所获得的共生组合关系(龚晶晶等, 2020;李文明等, 2021; 王乔林等, 2021; 李天虎等,

2022)。利用统计学软件 SPSS 25, 对数据用巴特莱特 (Bartlett)球度检验和变量间偏相关性 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)检验(唐瑞等, 2021; 冯博鑫等, 2023) (表 2)。从表 2可以看出, KMO值为 0.655, 符合 Kaiser 提出的判断其标准(>0.6), 巴特莱特球形度检 验 Sig(概率值)为 0.000, 不大于显著性为 0.05。因此, 根据以上条件,认为研究区数据适合做因子分析(樊 会民等, 2018; 牟妮妮等, 2020)。对数据的分析结果 运用其主成分分析法,采用正交旋转因子载荷矩阵划, 按其特征值>1和方差累计贡献率 65.796% 的阈值, 共提取3中因子成分(表3)。

4.3 研究区元素组合异常特征

4.3.1 元素组合异常下限

对上述研究区9种元素多元统计分析,结合研究 区成矿地质背景、成矿规律,划分3类元素组合,即 F1(Ag-Pb-Zn-Sb)、F2(Au-Cu-Ni-Bi)、F3(Hg)组 合元素,运用其异常衬度(杨宝荣等,2019;黄文斌等, 2020;李超等, 2020),来确定元素组合异常下限。异 常衬度法是指原始数值与背景值之比,来提高异常信 息,加强弱异常、突出多种元素嵌套组合异常的特点, 元素组合异常衬值为各单元素异常衬值之和。利用 其衬度法,可以消除不同元素平均值之间的差异,消 除元素间的量纲(袁和等, 2017; 王东等, 2020)。运用 软件 SPSS 25 箱图法, 按其各单元素衬值相加, 通过箱 图上下方不出现异常点为止,同时配合直方图,来得 出组合元素的均值(背景值)及标准差。通过公式 C=C₁+Kσ(C: 衬值异常下限; C₁: 衬值背景值; σ: 标准



图 3 R 型聚类分析谱系图

Fig. 3 R-type cluster analysis pedigree diagram

表 2 KMO 和巴特利特检验表

Tab. 2 KMO and Bartlett test

KMO取样适切性	0.655		
	近似卡方	1 668.056	
巴特利特球形度检验	自由度	36	
	显著性	0	

表 3 正交旋转因子载荷矩阵表

Tab. 3 Orthogonal rotation factor loading matrix

元素	F1	F2	F3
Au	0.052	0.489	0.263
Ag	0.512	-0.111	-0.502
Cu	0.235	0.792	-0.134
Pb	0.852	0.096	-0.015
Zn	0.821	0.119	-0.071
Ni	0.009	0.682	0.15
Sb	0.642	0.106	0.252
Bi	0.02	0.565	-0.273
Hg	0.114	-0.034	0.763
方差贡献率(%)	28.655	22.239	14.902
旋转累计方差贡献率(%)	28.655	50.894	65.796

差)来计算衬度异常下限。元素组合地球化学衬值内、 中、外带值统计结果(表 4)。根据统计结果,利用软 件 Surfer 13 对研究区元素组合异常绘制因子得分异 常图(图 4)。

表 4 甘肃礼县三峪地区元素组合异常衬值参数统计表

l'ab. 4	Statistics of soil geochemical lining parameters in
	Sanyu area, Li County, Gansu

元素组合	背景值	标准差	外带值下限	中带值	内带值
F1	4.090	0.586	4.382	4.676	5.262
F2	4.024	0.615	4.332	4.639	5.254
F3	1.000	0.190	1.095	1.190	1.380

F1因子代表 Ag-Pb-Zn-Sb 元素组合,其方差贡 献率为 28.655%,为中-低温热液成矿得元素组合形式, 在 3 个因子中占比最大,反映其在研究区与构造薄弱 带的运移及沉积岩层有关,是主要的成矿元素,且从 表 4 中可以看出,其因子的数值接近,可推断为是本 研究区锑多金属矿的成矿元素组合。F2因子代表 Au-Cu-Ni-Bi元素组合,其方差贡献率为 22.239%, 为中高温成矿元素组合。F3 因子代表 Hg 元素。其方 差贡献率 14.902%,为独立元素,为低温热液元素。从 表 3 可以看出,F1 因子中比例最大,综合元素参数统 计及研究区内地质构造及成矿规律,得出研究区 Sb 有具有良好的找矿潜力,结合元素聚类及因子分析, 其得出的分析结果相吻合。

4.3.2 元素组合异常特征

F1因子(Ag-Pb-Zn-Sb)主要为中低温热液成矿 元素组合,根据其地球化学中元素分类,Pb、Zn元素 都为亲硫元素,且Pb元素主要为亲酸性元素、不易迁

2023年



 1.第四系及残坡积物;2.下三叠统隆务河组二段;3.下三叠统隆务 河组一段;4.闪长玢岩;5.闪长玢岩;6.断层及编号



Fig. 4 Anomaly map of lining value in Sanyu area, Li County 移,而 Zn 元素灵活性较强、迁移能力强, Sb 元素为低 温元素,亲铜, Ag 元素亲铜, 且容易形成硫化物,因此, F1 元素组合可认为是一组有利于形成硫化物元素组 合。研究区内异常主要集中分布在构造带 F1 及附近, 呈带状分布,其赋存在下三叠统隆务河组(T₁/)灰岩及 泥钙质板岩夹灰岩中,与岩层走向及 F1 构造带方向 一致, 且该地层为主要的含矿层位。从整体异常分布 看,主要分布在研究区北部、中部及东南部, 且南部异 常未封闭,向外延伸。东南部元素组合异常长轴横穿 构造线,呈带状分布。异常组合元素套合程度高、强 度大、元素共生组合好,具有一定的组分分带及浓集 分带。其形态呈不规则及近椭圆状。通过与已知矿 床成矿规律相结合,认为研究区内寻找 Sb 多金属矿 的潜力较大。

F2因子为(Au-Cu-Ni-Bi)为高低温成矿元素元 素组合,Au为低温成矿元素,为亲硫性,且Cu主要表 现为亲硫性, Ni、Bi 主要为高温元素。Bi 元素通常富 集在中酸性岩中,同时也会在常见的硫化矿物中富集, 异常主要位于研究区北部及中部及南部, Au 异常主 要在分布于研究区西南部干沟子附近及中部蒲家湾, 西南部异常与 F1 因子 Sb 元素异常套合程度较好,且 异常未封闭,向南部延伸,其岩性主要为薄层灰岩,有 明显的浓集分带,呈不规则状展布。中部 Au 主要分 布在研究区蒲家湾,且分布范围较小,且强度低,呈不 规则状分布,异常规模不大,其岩性主要为下三叠统 隆务河组(T₁1)灰岩。研究区不仅有中高温元素,而且 低温元素也参与,Au元素异常可能由中高温硫化物 元素参与了金矿的形成。Cu-Ni-Bi元素主要出露在 研究区北部,呈圆形分布,局部呈星点状分布,元素强 度较低,异常规模不大,中部异常位于小沿脉闪长玢 岩中,异常中心穿过 F1 构造带,推测研究区异常由高 温元素为低温元素成矿提供了热源。

F3 因子(Hg)为独立元素,且 Hg 主要为熔点低的 金属元素,迁移能力较强,研究区异常分布小,强度低, 且内、外、中带组分不明显,呈椭圆状,星点状,研究 区异常主要分布在 F1 构造带两侧,零星状分布。因 子异常对研究区成矿元素关联较小。

5 远景区圈定及找矿前景分析

5.1 远景区圈定

对研究区原始数据计算得出因子分析,根据元素 组合衬值异常,按照衬值法,结合研究区地质成矿区 域背景及成矿地质特征及构造等综合因素,共圈定4 处远景区,其编号分别为A、B、C、D(图5)。

A 远景区: 主要在研究区东南部, 主要为 Ag、Pb、 Zn、Sb 元素异常组合, 且 Pb、Zn 元素异常未封闭, 向 测区东南外延伸, 面积约为 0.34 km², 元素异常之间套 合程度好, 异常强度相对较高, 浓集中心明显, 远景区 内出露主要地层为下三叠统隆务河组, 岩性主要为深 灰色灰岩、灰白色-灰色泥质、钙质板岩互层, 角砾灰



1.第四系及残坡积物; 2.下三叠统隆务河组二段; 3.下三叠统隆务河组一段; 4.闪长玢岩; 5.闪长玢岩; 6.断层及编号; 7.Au 衬度异常; 8.Ag 衬度异常; 9.Cu 衬度异常; 10.Pb 衬度异常; 11.Zn 衬度异常; 12.Ni 衬度异常; 13.Sb 衬 度异常; 14.Bi 衬度异常; 15.Hg 衬度异常; 16.踏勘位置

图 5 礼县三峪地区找矿远景区预测图 Fig. 5 Forecast map of prospecting target area in Sanyu area, Li County

岩夹板岩透镜体,灰岩硅化较强。研究区内构造破碎 带 F1 穿过元素组合异常长轴中心,与构造线方向大 致相同,且破碎带 F1 见有断层角砾岩、泉水出露,见 有方解石细脉相互交叉分布,且方解石脉有强的褐铁 矿化,沿方解石脉裂隙嵌入。从已知相邻崖湾锑矿床 成矿规律及成矿条件分析,主要受层位和构造控制, 成矿条件清晰,因此,预测远景区对寻找以 Sb 为主要 矿种的多金属矿找矿潜力较大。

B 远景区: 主要在研究区南家山西侧附近分布, 主要为 Ag、Pb、Zn、Sb、Hg 元素异常组成, Sb、Pb、Zn、 元素套合密切, 其异常分布面积约为 0.97 km², 异常强 度高、元素共生组合好, 具有一定的组分分带及浓集 分带。远景区内出露主要地层为下三叠统隆务河组, 主要岩性为深灰色薄-中层灰岩, 灰岩硅化较强。研 究区内构造破碎带 F1 穿过远景区组合异常中心, 大 致平行于异常长轴。远景区北部单元素 Pb、Zn、Sb 元素组合紧密套合, 异常处于第四系残坡积物中, 应 重点检查该远景区, 异常是由隐伏多金属矿导致还是 与土壤样品引起。因此, 该远景区对于寻找 Sb 多金 属隐伏矿床意义重大。

C远景区:主要在研究区简河里附近分布,且Pb、 Zn、Sb、Au、Cu、Ni、Hg元素均有显示,其异常分布面 积为1.24 km²。Pb-Zn-Sb、Cu-Ni组合套合密切,异 常元素共生组合好,具有浓集分带。Au异常出露在 简河里及蒲家湾,异常面积小,分布范围小,呈椭圆状 分布,且强度低,异常规模不大。远景区内出露主要 地层为下三叠统隆务河组,主要岩性为深灰色薄-中 层灰岩夹泥钙质板岩中,且围岩蚀变主要为褐铁矿化, 灰岩硅化较强。远景区内有小沿脉煌斑岩侵入,为异 常成矿物质提供了热液移动及汇聚重要场所。远景 区组合异常位于研究区内构造破碎带F1南侧。该远 景区对寻找 Pb、Zn多金属矿找矿潜力大。

D 远景区: 主要在研究区北部, 主要为 Ag、Pb、Zn、 Sb、Au、Cu、Ni、Hg 元素, Sb 元素异常未封闭, 向测区 北部延伸, 与 Pb-Zn-Sb、Cu-Ni 元素组合套合紧密, 异常元素共生组合好, 具有三级浓集中心。其异常分 布面积为 2.02 km²。其中, Ag-Pb-Zn-Sb 元素组合规 模最大。远景区内出露主要地层为下三叠统隆务河 组,主要岩性为深灰色薄-中层灰岩,灰岩硅化较强。 远景区组合异常位于研究区内构造破碎带 F1 西侧。 该远景区对寻找隐伏 Sb 多金属矿找矿前景潜力大。

5.2 找矿前景分析

研究区下三叠统隆务河组,根据前期野外现场踏 勘,在研究区滴嘴里东约为100m处(踏勘位置见图5), 发现一构造蚀变带,该带宽约为1m,带内整体呈黄褐 色,主要充填物为灰岩碎块、板岩碎块及泥钙质胶结 物组成,局部见有方解石脉,上盘主要为钙质板岩,下 盘为薄层灰岩,该带与下盘接触面产状为30°∠72°。 围岩蚀变主要为褐铁矿化、硅化。通过与相邻崖湾锑 矿床的成矿规律及控矿要素来看,其 Sb 主要受层位 及断裂控制。根据对研究区土壤地球化学元素分析, 所得出研究区内元素异常高值与层位及与构造密切 相关,且与异常元素组合特征吻合程度基本一致,对 圈定的 A、B、C、D 远景区都在研究区下三叠统隆务 河组及构造带 F1 中。因此, 遵循从已知到未知的找 矿思路,研究区内Sb多金属矿,可能受下三叠统隆务 河组及构造带 F1 控制,通过对研究区现场踏勘,进一 步为缩小找矿远景区找矿指明了方向。研究区具有 较好的成矿地质背景及成矿条件,找矿潜力及前景 优越。

6 结论

(1)通过元素统计分析,定量分析 Au、Ag、Cu、 Pb、Zn、Ni、Sb、Bi、Hg 9 种元素,运用变异系数、浓 度系数及元素分形分布特征等方法,发现研究区内 Au、Pb、Zn、Sb 元素找矿有一定潜力,元素异常分布 与区域成矿地质条件相吻合。Ag、Cu、Hg、Bi、Ni 元 素分异程度弱,找矿潜力较小,土壤地球化学在该研 究区寻找锑多金属矿有良好效果,对该区进一步找矿 有指导意义。

(2)根据聚类分析及因子得分分析,将研究区 9 种元素分为 3 类元素组合,即 F1 因子代表 Ag-Pb-Zn-Sb 元素组合为中-低温热液成矿得元素组合形式, 反映其在研究区与构造薄弱带的运移及沉积岩层有 关,是主要的成矿元素。F2 因子代表 Au-Cu-Ni-Bi 元素组合,为中高温成矿元素组合。F3 因子代表 Hg 元素,为低温热液元素。

(3)通过对元素异常衬度计算,结合元素组合异常特征,在研究区共圈出4处找矿远景区,经过系统

全面综合分析,结合已知矿床成矿背景及成矿规律特征,认为圈定的4处远景区是以锑多金属矿的有利部位,成矿前景广阔,是寻找锑多金属为主的重要远景区,为下一步地质找矿工作指明了方向。

参考文献(References):

- 成秋明.覆盖区矿产综合预测思路与方法[J].地球科学(中国 地质大学学报),2012,37(6):1109-1125.
- CHENG Qiuming. Ideas and Methods for Mineral Resources Integrated Prediction in Covered Areas [J]. Earth Science(Journal of China University of Geosciences), 2012, 37(6): 1109–1125.
- 段晓华,陈健.甘肃省礼县崖湾金矿床地球化学异常特征[J].甘 肃地质, 2008, 17(4):17-20+25.
- DUAN Xiaohua, CHEN Jian. Study on Geochemical Anomaly Mode of Aiwan Gold Deposit, Lixian County of Gansu Province [J]. Gansu Geology, 2008, 17(4): 17–20+25.
- 樊会民,安兴,张嘉声,等.陕西省秦巴地区金元素找矿预测区 划分及其地球化学特征[J].物探与化探,2018,42(4): 682-688.
- FAN Huimin, An Xing, ZHANG Jiasheng, et al. Division of gold element prospecting area in Qinba region of Shaanxi Province and its geochemical characteristics[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(4): 682–688.
- 冯博鑫,徐多勋,张宏宇,等.基于最小数据集的周至地区土壤 重金属地球化学特征及成因分析[J].西北地质,2023, 56(1):284-292.
- FENG Boxin, XU Duoyun, ZHANG Hongyu, et al. Geochemical Characteristic of Heavy Metal in Zhouzhi Area and Analysis of Their Causes Based on Minimum Data Set[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 284–292.
- 黄学强,罗先熔,刘巍,等.凹陷盆地铜镍多金属矿床地电化学 异常特征及找矿预测[J].物探与化探,2013,37(2): 199-205.
- HUANG Xueqiang, LUO Xianrong, LIU Wei, et al. Features of Geo-Electrochemical Anomaly and Copper-Nickel Prospecting Prognosis in Hollow Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(2): 199–205.
- 黄文斌, 罗先熔, 刘攀峰, 等. 青海省石灰沟地区水系沉积物测 量地球化学特征及找矿预测[J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 150-159.
- HUANG Wenbin, LUO Xianrong, LIU Panfeng, et al. Geochemical characteristics of stream sediments and ore prospecting prediction in Shi hui gou Aear, Qinghai Province [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(3): 150–159.
- 何旺,罗先熔,高文,等.青海省都兰县五龙沟-高地地区水系沉积物地球化学特征及找矿远景[J].矿物岩石地球化学通报,2019,38(5):1017-1023.

HE Wang, LUO Xianrong, GAO Wen, et al. Geochemical Character-

istics of Stream Sediments in the Wulonggou-Gaodi area, Dulan County, Qinghai Province and Their Exploration Prospective[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2019, 38(5): 1017–1023.

- 龚晶晶,杨剑洲,马生明,等.利用因子分析和分形分析识别内蒙古黑鹰山地区矿致地球化学异常[J].物探与化探,2020, 44(1):122-131.
- GONG Jingjing, YANG Jianzhou, MA Shengming, et al. Recognition of ore-induced geochemical anomaly by combined factor and fractal analysis in Heiyingshan, Inner Mongolia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1); 122–131.
- 姜寒冰,杨合群,赵国斌,等.西秦岭成矿带区域成矿规律概论 [J].西北地质,2023,56(2):187-202.
- JIANG Hanbing, YANG Hequn, ZHAO Guobin, et al. Discussion on the Metallogenic Regularity in West Qinling Metallogenic Belt, China[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 187–202.
- 黎彤.化学元素的地球丰度[J].地球化学,1976,5(3):167-174.
- LI Tong. Chemical element abundances in the Earth and its major shells[J]. Geochemistry, 1976, 5(3): 167–174.
- 罗先熔,文美兰,欧阳菲,等.勘查地球化学[M].北京:冶金工业 出版社,2008.
- LUO Xianrong, WEN Meilan, OUYANG Fei, et al. Exploration geochemistry [M]. Beijing: Metallurgical Industy Press, 2008.
- 刘建宏,张新虎,牛洪斌,等.甘肃省区域地球化学场特征[J]. 甘肃地质,2015,24(4):1-15.
- LIU Jianhong, ZHANG Xinhu, NIU Hongbin, et al. Characteristics of regional field in Gansu Province[J]. Gansu Geology, 2015, 24(4): 1–15.
- 刘开君. 西秦岭热液金矿床地球化学特征及成因探讨-以大桥 金矿为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- LIU Kaijun. Geochemistry Characteristics and Genesis of Hydrothermal Gold Deposits in West Qinling: As Exemplified by Daqiao Gold Deposit[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- 李超, 罗先熔, 汤国栋, 等. 内蒙古额济纳旗标山北土壤地球化 学异常特征及找矿前景[J]. 地质与勘探, 2020, 56(6): 1170-1182.
- LI Chao, LUO Xianrong, TANG Guodong, et al. Characteristics of Soil Geochemical Anomalies and Ore-Search Prospect in the North of Biaoshan, Ejinaqi, Inner Mongolia[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(6): 1170–1182.
- 李文明,刘拓,孙吉明,等.新疆北山白山地区地球化学特征及 找矿远景预测[J].西北地质,2021,54(4):42-48.
- LI Wenming, LIU Tuo, SUN Jiming, et al. Geochemical Characteristics and Prospecting Prognosis in Baishan Area of Xinjiang Beishan [J]. Northwestern Geology, 2021, 54(4): 42–48.
- 李天虎,彭桥梁,王伟,等.新疆温宿县盐场地区水系沉积物地 球化学特征及找矿效果[J].西北地质,2022,55(1):78-92.
- LI Tianhu, PENG Qiaoliang, WANG Wei, et al. Geochemical Characteristics and Ore Prospecting of Stream Sediment in Yanchang Area of Wensu, Xinjiang[J]. Northwestern Geology,

2022, 55(1): 78-92.

- 牟妮妮,孙祥,万修权.西藏米拉山地区化探异常特征与找矿预测[J].地质通报,2020,39(8):1182-1190.
- MOU Nini, SUN Xiang, WAN Xiuquan. Geochemical anomaly characteristics and mineral potential mapping in Milashan area of Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(8): 1182–1190.
- 彭素霞,赵文川.寨上金矿区成矿机制及成矿预测[J]. 地质与 勘探, 2007, 43(2): 40-44.
- PENG Suxia, ZHAO Wenchuan. Mineralization Mechanism and Prognosis in the Zhaishang Gold mining area[J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(2): 40–44.
- 施海鹏,魏俊浩,赵少卿,等.宁夏贺兰山北段1:5万化探数据 的含量-面积分形异常特征及找矿预测[J].地质科技情报, 2015,34(3):71-79+95.
- SHI Haipeng, WEI Junhao, ZHAO Shaoqing, et al. Content-Area Fractal Characteristics and Prospecting Prediction for the Northern Helanshan: 1 : 50 000 Geochemical Measurement Data[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(3): 71–79+95.
- 申维.分形求和法及其在地球化学数据分组中的应用[J].物探 化探计算技术,2007,(2):134-137+88.
- SHEN Wei. Fractal Summation Methods and Its Application in Geochemical ElementL Date for Population Limits[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, (2): 134–137+88.
- 孙则朋,王自翔,徐亮,等.甘肃大桥金矿硅质岩地球化学特征 及其地质意义探讨[J].地球化学,2016,45(5):499-509.
- SUN Zepeng, WANG Zixu, XU Liang, et al. Geochemical characteristics and geological significance of cherts from the Daqiao gold deposit, Gansu Province[J]. Geochimica, 2016, 45(5): 499–509.
- 苏艺怀,刘攀峰,罗先熔,等.甘肃省夏河县唐尕昂地区土壤地 球化学特征及找矿前景分析[J].桂林理工大学学报,2021, 41(1):34-41.
- SU Yihuai, LIU Panfeng, LUO Xianrong, et al. Soil geochemical characteristics and prospect potential of Tanggaang survey area, Xiahe County, Gansu[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2021, 41(1): 34–41.
- 唐瑞,欧阳菲,罗先熔,等.相山矿田游坊地区地电提取找矿预测[J].物探与化探,2021,45(6):1425-1438.
- TANG Rui, OUYANG Fei, LUO Xianrong, et al. The prediction of electrochemical prospecting in Youfan area of the Xiangshan ore field[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(6); 1425–1438.
- 王会敏,陈守余,赵江南,等.柴北缘都兰地区 Pb-Zn 矿化信息 提取与评价[J].地质科技情报,2016,35(5):131-138.
- WANG Huiming, CHEN Shouyu, ZHAO Jiangnan, et al. Pb-Zn Mineralization Information Extraction and Evaluation in Doulan Area, Qaidam[J]. Geological Science and Technology Informa-

tion, 2016, 35(5): 131-138.

- 王发明, 翟玉林, 李艳军, 等. 青海大场金矿田北缘灭格滩矿区 土壤地球化学异常信息提取及找矿预测[J]. 地质科技情 报, 2015, 34(5): 127-133.
- WANG Fanming, ZHAI Yulin, LI Yanjun, et al. Soil Geochemical Anomaly Information Extraction and Prospecting Prediction of the Miegetan Gold Deposit, Northern Segment of the Dachang Gold Mine, Qinghai Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(5): 127–133.
- 王乔林, 孔牧, 韩伟, 等. 甘肃国宝山铷矿区土壤地球化学特征 研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(5): 101-107.
- WANG Qiaolin, KONG Mu, HAN Wei, et al. Geochemical characteristics of soil in Guobaoshan rubidium mining area, Gansu province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(5): 101–107.
- 王东,罗先熔,韦彦婷,等.陕南何家垭地区土壤地球化学特征 及找矿预测[J].金属矿山,2020,(11):172-182.
- WANG Dong, LUO Xianrong, WEI Yanting, et al. Soil Geochemical Characteristics and Prospecting Prediction in Hejiaya Area of Southern Shaanxi[J]. Metal Mine, 2020, (11): 172–182.
- 谢学锦. 勘查地球化学: 发展史·现状·展望[J]. 地质与勘探, 2002, 38(6): 1-9.
- XIE Xuejin. Exploration geochemistry: Retrospect and Prospect[J]. Geology and Exploration, 2002, 38(6): 1–9.
- 谢世强. 西秦岭大桥金矿成矿物质来源及成因探讨[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- XIE Shiqiang. Ore Fluids and Metal Sources and Genesis of the Daqiao Gold Deposit, Western Qinling Orogen[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- 杨宝荣,张新铭,李文君,等.青海沟里地区水系沉积物地球化 学异常特征及找矿预测[J].地质科技情报,2019,38(4): 181-192.
- YANG Baorong, ZHANG Xinming, LI Wenjun, et al. Geochemical Characteristics of Stream Sediments and Ore Prospecting Orientation in Gouli Area, Qinghai Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(4): 181–192.
- 杨明莉,薛林福,冉祥金,等.智能矿产地质调查方法——以甘 肃大桥-崖湾地区为例[J].岩石学报,2021,37(12): 3880-3892.
- YANG Mingli, XUE Linfu, RAN Xiangjin, et al. Intelligent mineral geological survey method: DaqiaoYawan area in Gansu Province as an example[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(12): 3880-3892.
- 袁和, 罗先熔, 李武毅, 等. 西藏邦卓玛地区土壤地球化学特征 及找矿预测[J]. 地质与勘探, 2017, 53(3): 472-481.
- YUAN He, LUO Xianrong, LI Wuyi, et al. Geochemical Characteristics of Soil and Prospecting Prediction of the Bangzhuoma Region, Tibet[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(3): 472–481.

- 周叶泽.甘肃崖湾锑矿床地质地球化学特征及成因探讨[D].北 京:中国地质大学,2020.
- ZHOU Yeze. Geological and Geochemical Characteristics and Genesis of the Yawan Antimony Deposit in Gansu Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- 张鹤启,牛鹏飞,刘胜江,等.甘肃崖湾-大桥整装勘查区石峡幅 1:50000 矿产地质调查成果数据库[J].中国地质,2020, 47(S2):95-121.
- ZHANG Heqi, NIU Pengfei, LIU Shengjiang, et al. Database of 1:50 000 Mineral Geological Survey Resultsof the Shixia Mapsheet in Yawan –Daqiao Integrated Exploration Area, Gansu Province[J]. Geology in China, 2020, 47(S2): 95–121.
- 赵欣怡, 罗先熔, 杨笑笑, 等. 河南洛宁石龙山金多金属矿预查 区土壤地球化学特征及找矿远景分析[J]. 矿物岩石地球 化学通报, 2020, 39(4): 768-778.
- ZHAO Xinyi, LUO Xianrong, YANG Xiaoxiao, et al. Soil Geochemical Characteristics and Prospecting Potential Analysis of the Shilongshan Au-polymetallic Prospecting Area, Luoning County, Henan Province [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2020, 39(04): 768-778.
- 张焱, 成秋明, 周永章, 等. 分形插值在地球化学数据中的应用[J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2011, 50(1): 133–137.
- ZHANG Yan, CHENG Qiuming, ZHOU Yongzhang, et al. Assessment of Fractal Interpolation Method in GeochemicalExploration[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2011, 50(1): 133–137.
- 张翔,戴霜,刘建宏.甘肃西秦岭金矿成矿与找矿研究[M].北 京:地质出版社,2009.
- ZHANG Xiang, DAI Shuang, LIU Jianhong. Research on Metallogenesis and Prospecting of Gold Deposit in West Qinling, Gansu[M]. Beijing: Geological Publishing Press, 2009.
- 张家瑞,宿虎,蒋文,等.甘肃崖湾-大桥金锑矿整装勘查区 1:50000 矿产资源潜力评价数据集[J].中国地质,2020, 47(S2):161-192.
- ZHANG Jiarui, SU Hu, JIANG Wen, et al. Dataset of 1 : 50000 Mineral Resource Potential Assessment of Gold–Antimony Deposit Integrated Exploration Area in Yawan –Daqiao Area, Gansu Province [J]. Geology in China, 2020, 47(S2): 161–192.
- Cohen D R, Kelley D L, Anand R, et al. Major Advances in Exploration Geochemistry, 1998-2007[J]. Geo-chemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2010, 10(1): 3–16.
- Liu X C, Wang W L, Pei Y R, et al. A knowledge-driven way to interpret the isometric log-ratio transfor-mation and mixture distributions of geochemical data[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2020, 210: 1–9.
- Wang J, Zuo R G, Caers J. Discovering geochemicalpatterns by factor-based cluster analysis[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017, 181: 106–115.