

DOI:10.19657/j.geoscience.1000-8527.202603180094

地球化学测量在甘肃礼县中川地区金矿调查评价中的应用与成效

赵超^{1,2}, 白兆华^{1,2,*}, 贾建军^{1,2}, 许安民^{1,2}, 李伟^{1,2}, 杨可^{1,2},
王雄^{1,2}, 刘宇刚^{1,2}, 雷帅^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 2. 中国地质调查局金矿勘查技术创新中心, 陕西 西安 710100)

摘要: 岷(县)—礼(县)成矿带是西秦岭地区重要的金多金属成矿带, 中川测区位于成矿带东段, 属于典型浅覆盖区, 区内金银砷等背景值高, 地质条件有利, 成矿前景较好。为实现该区金矿找矿突破, 开展了1:2.5万地球化学测量工作, 利用地质和数学分析方法, 对Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Sb、As、W、Mo、Bi共10种元素的地球化学特征参数、元素相关性、元素分布和异常特征进行了分析研究, 圈定综合异常7处。优选4处综合异常采用1:1万地质草测、槽探、钻探等手段进行了查证, 新发现4条含金构造蚀变带, 3条金矿体, 估算金潜在资源5365 kg, 实现了找矿突破。充分证实该方法在本区具有较好的找矿应用价值, 同时可为邻区或相似景观区金矿找矿提供重要参考, 值得推广应用。

关键词: 地球化学测量; 岷(县)—礼(县)成矿带; 中川地区; 方法技术; 找矿效果

中图分类号: P168.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2026)04-1034-14

Application of Geochemical Survey Method in the Investigation and Assessment of Gold Deposits in Zhongchuan Area and Its Prospecting Effect, Lixian County, Gansu Province

ZHAO Chao^{1,2}, BAI Zhaohua^{1,2,*}, JIA Jianjun^{1,2}, XU Anmin^{1,2}, LI Wei^{1,2}, YANG Ke^{1,2},
WANG Xiong^{1,2}, LIU Yugang^{1,2}, LEI Shuai^{1,2}

(1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710000, China; 2. Technology Innovation Center for Gold Ore Exploration, China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: The Min-Li metallogenic belt represents a significant gold-polymetallic province in the Western Qinling region. The Zhongchuan survey area, located in the eastern sector of this belt, is characterized by typical shallow overburden cover. This area exhibits high background values of elements such as gold, silver, and arsenic, favorable geological conditions, and promising prospecting potential. To facilitate breakthroughs in gold exploration, a 1:25,000-scale geochemical survey was conducted. Using geological and mathematical analysis methods, the geochemical characteristic parameters, elemental correlations, distribution patterns, and anomaly features of ten elements (Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Sb, As, W, Mo, and Bi) were systematically investi-

收稿日期: 2026-03-18; 修回日期: 2026-06-11; 编辑: 袁茂文。

基金项目: 中国地质调查局项目“甘肃岷县磨沟一大庄里一带金矿调查”(DD20242950), “秦岭—豫西地区战略性矿产调查”(DD20240019)。

作者简介: 赵超, 男, 工程师, 1992年出生, 主要从事固体矿产调查评价工作。Email: zhaochao199205@126.com。

***通信作者:** 白兆华, 男, 高级工程师, 1984年出生, 主要从事固体矿产调查评价工作。Email: 21676140@qq.com。

引用格式: 赵超, 白兆华, 贾建军, 等. 地球化学测量在甘肃礼县中川地区金矿调查评价中的应用与成效 [J]. 现代地质, 2026, 40 (4): 1034-1047. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202603180094.

ZHAO Chao, BAI Zhaohua, JIA Jianjun, et al. Application of Geochemical Survey Method in the Investigation and Assessment of Gold Deposits in Zhongchuan Area and Its Prospecting Effect, Lixian County, Gansu Province [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40 (4): 1034-1047. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202603180094.

gated. As a result, seven integrated anomalies were delineated. Four prioritized comprehensive anomalies were investigated through methods including 1:10,000-scale reconnaissance geological mapping, trenching, and drilling. This follow-up work led to the discovery of four new gold-bearing structural alteration zones and three gold ore bodies, with estimated gold resources of 5365 kg, marking a significant exploration breakthrough. These results fully demonstrate the strong practical value of this geochemical survey methodology for mineral exploration in the study area. Moreover, they provide an important reference for gold prospecting in adjacent regions or areas with similar geological settings, warranting broader application and promotion.

Key words: geochemical survey; Min-Li metallogenic belt; Zhongchuan area; method and technique; prospecting effect

0 引言

西秦岭造山带是秦岭造山带的西延,位于华北板块和扬子板块之间,是中央造山带的重要组成部分,优越的成矿地质条件孕育了丰富多样的矿产资源^[1-3]。岷(县)—礼(县)成矿带是西秦岭地区重要的金多金属成矿带,分布有李坝、金山、寨上、锁龙等众多中大型金矿床^[4-5]。中川地区位于岷(县)—礼(县)成矿带东部,围绕区内中川岩体15 km范围内分布有17个金矿床(点),总体来看区内找矿潜力较大,找矿前景较好^[6]。

1:2.5万地球化学测量是一种广泛使用且成效显著的勘查手段,工作主要以水系沉积物测量为主,土壤测量为辅,在水系发育区开展水系沉积物测量,水系样品不能采集的地区开展土壤测量作为补充^[7-9]。该方法在区内李坝、金山金矿勘查过程中成效显著^[10-11]。鉴于区内具有良好的金成矿条件,为快速查明区内元素分布规律,进一步缩小靶区,结合该区地球化学景观和前人化探工作经验,本次在中川地区部署1:2.5万地球化学测量99 km²,通过分析元素地球化学特征,圈定和查证化探异常,寻找矿化线索,以期实现找矿突破,同时为区域找矿提供示范。

1 地质背景

1.1 区域地质背景

岷(县)—礼(县)成矿带地理位置位于甘肃省礼县至岷县一带,是西秦岭地区重要的金多金属成矿带,北侧以武山—天水断裂与北秦岭—祁连地块相接,南侧以夏河—岷县—西和—凤镇深大断裂与洮河成矿带相邻^[12-13]。成矿带内发生多期次构造—岩浆事件,东部发育有印支—燕山期岩体群,围绕岩体产出众多金矿床(点),成矿条件优

越。其中中川岩体周缘是重要的金矿集区^[6]。

区域主要出露泥盆纪、石炭纪、二叠纪、三叠纪、白垩纪和第四纪地层,其中以泥盆纪和二叠纪地层出露最为广泛。泥盆系主要分布在区域锁龙断裂东部,岩性主要为变质石英砂岩、粉砂质板岩、千枚岩、灰岩等。石炭系主要分布在区域东侧中川一带,为一套稳定的深海相沉积岩建造,岩性主要为变质砂岩、砂质板岩等。二叠系主要分布于区域东侧岷县一带,为一套浅海相泥岩建造、碎屑岩建造、碳酸盐岩建造,岩性主要为泥质粉砂岩、石英砂岩、泥晶灰岩等(图1)。泥盆系和二叠系为区域金矿的主要赋矿地层。

区内经历多期次构造活动影响,构造变形强烈、性质复杂,但总体保持着北西向的主构造方向。主要断裂有漳县—武山断裂、岷县—宕昌断裂,总体呈北西向展布。主干断裂两侧次级褶皱、断裂构造发育,一系列平行排列的次级断裂是重要的控矿、容矿断裂,已知的李坝、金山、崖湾等金矿矿体分布与断裂关系十分密切^[14-15]。

区域内岩浆活动剧烈,具有多旋回、多期次的特征,主要分布在岷(县)—礼(县)成矿带中东部一带,出露面积约700 km²。形成时代以印支—燕山期为主,岩性以中酸性花岗岩为主,多呈巨大岩基产出。主要有中川、柏家庄、教场坝、绿础坝、闫井岩体群,被誉为“五朵金花”,此外北部有温泉岩体出露。同时,区内闪长岩、煌斑岩脉也十分发育。

1.2 矿区地质特征

矿区位于中川岩体东边界,出露地层主要为中泥盆统舒家坝群上岩组(D_2SH^2)、东扎口组(C_2d)。其中中泥盆统舒家坝群上岩组(D_2SH^2)呈北西向展布于矿区北部,岩性为灰色、灰白色变泥质粉砂岩,中细粒变石英砂岩,灰色、灰绿色

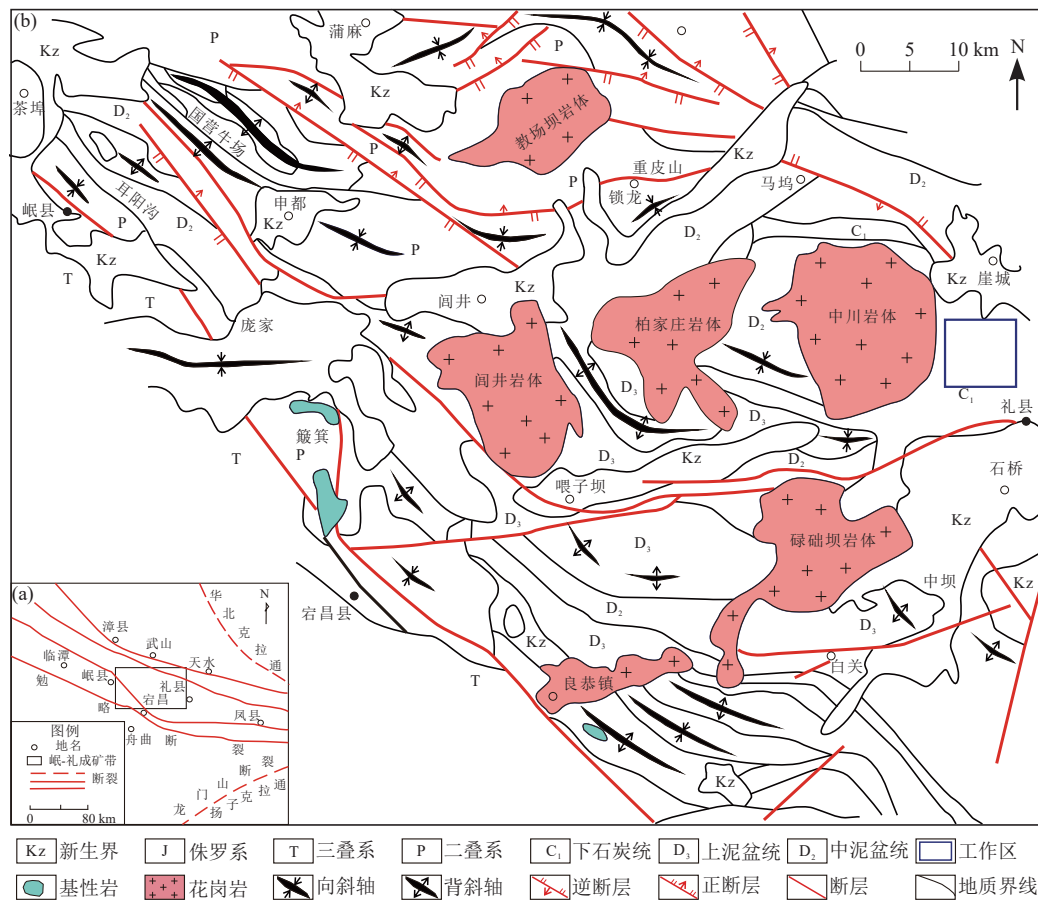


图1 西秦岭造山带构造格架图 (a) (修改自郭娜等^[5]) 和岷—礼成矿带地质简图 (b) (修改自马承等^[12])

Fig. 1 Tectonic framework of Western Qinling orogenic belt (a, modified from Guo et al. ^[5]), and geological sketch map of Minxian-Lixian metallogenic belt (b, modified from Ma et al. ^[12])

斑点状板岩、千枚岩等。东扎口组 (C_2d) 呈北西向展布于测区南部, 岩性为含炭质板岩、粉砂质板岩、泥质粉砂质板岩 (图2)。

矿区位于石家河坝复式向斜的北翼马坞—李坝复式背斜南翼, 次级褶皱、小褶曲十分发育, 轴线呈北西西向, 两翼倾角约 $60 \sim 80^\circ$ 总体南缓北陡, 层间褶皱较为发育, 两翼倾角不等, 总体呈北陡南缓的趋势, 与岩层走向大体一致。该区在多期次区域构造活动作用下, 与褶皱构造密切相关的断裂构造较为发育, 断裂构造按其展布方向有北西西、南北、北西、东西向四组, 其中北西西、东西向断裂为区内主要控矿、容矿断裂, 沿断层面可见花岗岩岩脉充填。

区内花岗岩脉、花岗细晶岩脉、花岗斑岩脉和煌斑岩脉以及石英脉分布广泛, 花岗岩脉、花岗斑岩脉宽 $1 \sim 10$ m, 煌斑岩脉宽数米, 石英脉宽 $1 \sim 100$ cm, 多沿岩层破裂面呈顺层或切层充填。在剥土、探槽工程中多见石英脉分布, 与矿化关系密切。

区内包括三个 $1:5$ 万水系沉积物综合异常, 分别是 Hs-7 水系沉积物综合异常 (Au、Sn、Hg、Ag、Sb、As、Mo、Pb、Zn、W、Bi、Cr)、Hs-8 水系沉积物综合异常 (Au、Ag、Sb、As、Bi、Mo、Cu) 和 Hs-9 水系沉积物综合异常 (Au、Ag、Sb、Pb、Bi、Zn、Co、Cu、Ni、Mn、Mo)。这些综合异常具有中温热液活动作用的组合特点, 是寻找与此有关的 Au、Sn、Hg 等矿产的重要依据。

在中川岩体东北部、东部和南部 $1 \sim 4.5$ km 范围内已发现金矿床 (点) 共二十余个, 典型矿床有中川岩体东北部的李坝金矿床和南部的金山、马泉金矿床。中川岩体中部以及其东部发现有铀矿床 (点)。在中川地区西南部发现小峪河小型铜铅矿床。

由上可见, 中川地区成矿地质条件优越, 同时有 $1:5$ 万 Au 化探异常, 具有较大的金找矿潜力, 因此选择该区开展金矿调查评价工作。

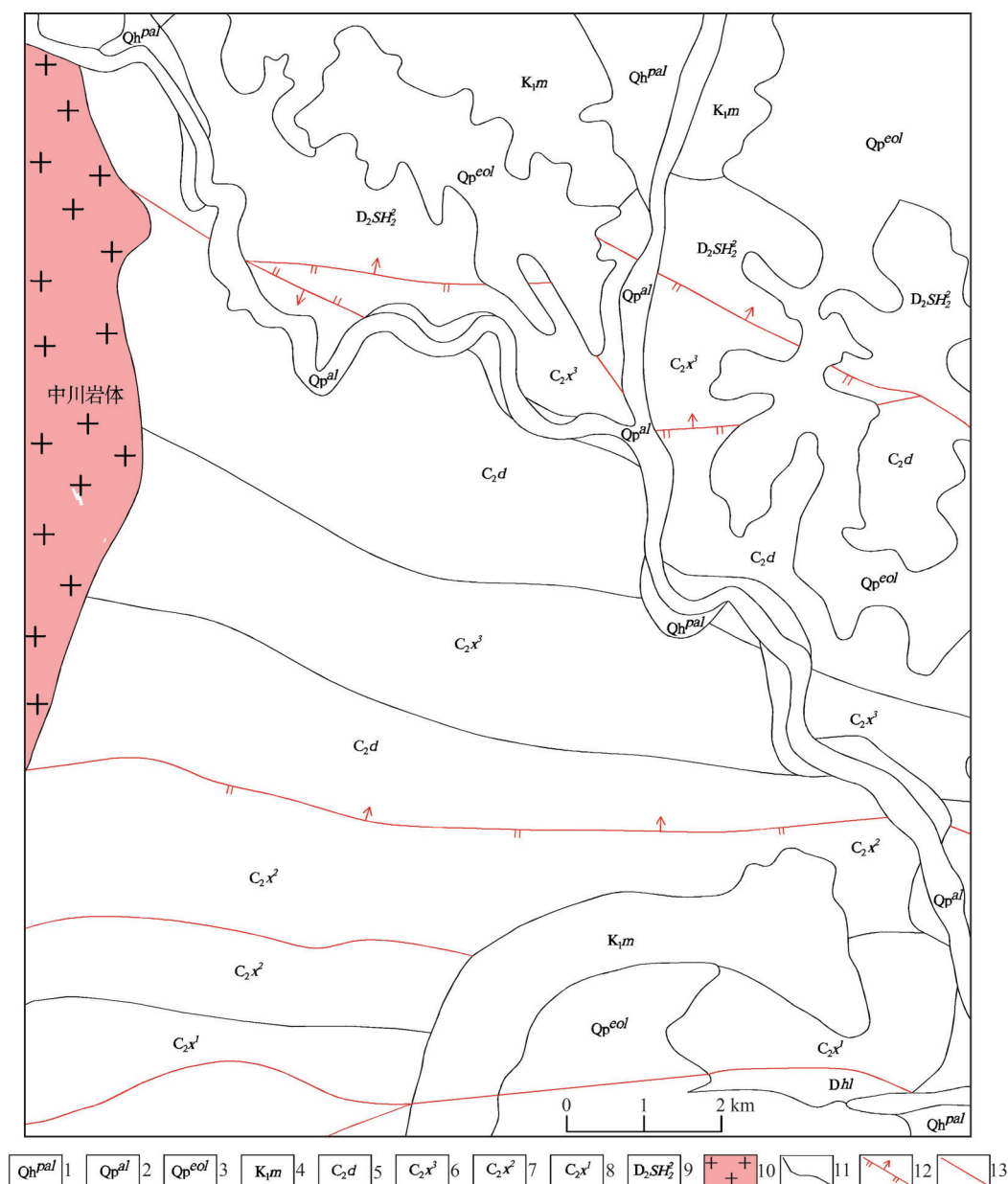


图2 中川地区地质简图

Fig. 2 Geological map of Zhongchuan area

(1)第四系冲洪积物;(2)第四系冲积物;(3)第四系风成黄土;(4)麦积山组;(5)东扎口组;(6)下家岭组第三岩性段;(7)下家岭组第二岩性段;(8)下家岭组第一岩性段;(9)舒家坝群上岩组;(10)花岗岩;(11)地质界线;(12)逆断层;(13)性质不明断层

2 样品采集及分析方法

2.1 样品采集和处理

本次1:2.5万地球化学测量具体工作内容包含采样点布设、样品采集、定点与记录、样点标记、航迹管理、野外工作质量管理等方面的具体内容。技术标准参照《地球化学普查规范(1:50000)》(DZ/T 0011—2015)与《1:25000地球化学测量规范》(DB 63/T 1936—2021)执行。工作区属于湿润半湿润中低山景观区,区内沟系较为发育,水系沉

积物样品可以有效的代表汇水域基岩的物质成分。本次地球化学测量面积为99 km²,共采集样品1659件(含重采样42件),采样密度16.33个/km²,达到规范 and 设计要求。

采样点位均匀布设,每个点位最大程度地控制上游汇水域。采样过程中以1:5万地形图放大至1:2.5万作为底图,结合遥感影像图进行样点布设。采样前,拨去地表浮土或腐殖层,采集粗细粒级混合样品,采样深度一般10~30 cm。为提高样品的代表性,在样点水系上下游20~30 m内选择3处以

上地点采样组合为1件样品。当无法采集到水系沉积物样品时，采集沟系中边坡上的坡积物，以采到坡积物中的碎石层或基岩上伏的半风化层物质为宜，采样时避免采集腐殖质、黏土质等物质影响。

样品加工粒级参照普查规范和邻区地化测量粒级，本次采用-10~+80目截取粒级。样品加工时去除样品中黏土颗粒、石块、草根、树叶等杂质，严格按照规范要求的样品加工流程进行无污染加工。充分筛净之后，将样品用四分法进行缩分，分两份装入两个纸样袋。一份为正样送化验室检测，另一份为副样留存。正样和副样重量均在150~200 g之间。

2.2 测试分析

样品分析测试工作由中国地质调查局西安矿产资源调查中心实验室承担，选择所处成矿区带内主要的成矿元素和指示元素，要求测试Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Sb、As、W、Mo、Bi等10种元素。根据《地球化学普查规范》(DZ/T0011—2015)及《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T0130—2006)中对分析测试质量的要求，选取5种方法进行分析测试(表1)。分析方法的准确度采用国家一级标准物质进行控制，选用8个国家一级标准物质(GBW系列)，用选定的分析方法，对每件国家一级标准物质分析12次，以与标准物质对数差确定分析方法准确度与精密度，其结果符合规范要求。质量控制随机提取90样品(占总样品数的5.56%)，编上密码样号，交由测试分析人员进行重复分析，各元素合格率均在95%以上，由此可见样品分析数据真实、质量可靠。

3 地球化学特征

3.1 元素富集特征

元素含量平均值(X)、标准离差(S)、变异系

表1 元素测试方法

Table 1 Element testing methods	
测试元素	测试方法
Au	泡塑富集—石墨炉原子吸收法(GF-AAS)
Ag	垂直电极—发射光谱法(ES)
As、Sb	氢化物发生—原子荧光光谱法(HG-AFS)
Cu、Zn	电感耦合等离子光谱法(ICP-OES)
Pb、Mo、W、Bi	电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)

数(C_v)、富集系数(K)等是讨论地球化学特征和规律的重要参数^[16-18]。本次工作利用GeoIPAS软件对10元素的分析测试结果进行统计处理，得到了各类参数(表2)。以工作区样品各元素剔除离群值后的数据集为基础，算出10种元素的平均值作为该区背景值，与区域1:20万化探背景值对比可见本区元素丰度特征明显^[19]，与区域背景差异显著。

工作区内Au、As、Sb等3种元素富集明显，富集系数均大于3.00，其中Au元素富集系数最大，值为3.81；Mo、W、Ag、Cu等4种元素相对富集富集系数均大于1.3；Bi、Pb、Zn等3种元素与区域背景值较为接近，无明显富集或贫化。总体来看，该区成矿作用强烈，Au元素富集明显，具有良好的Au找矿前景。

3.2 元素离散特征

10种元素含量数据的变异系数(C_{v1})和背景数据(剔除畸变数据后的数据)的变异系数(C_{v2})分别反映两类数据集的离散程度，用 C_{v1}/C_{v2} 反映背景拟合处理时对离散值(特高值、特低值)的削平程度^[20-21]。利用 C_{v1} 和 C_{v1}/C_{v2} 制作的变化系数散点图能直观的反映区内元素含量分布的均匀或离散程度^[22-23]。

从变异系数散点图(图3)可以清晰的看出：

①Cu含量变异幅度大，高强度数据多，但在区内

表2 中川地区地球化学参数统计表

Table 2 Geochemical parameters in Zhongchuan area

元素/参数	Ag	As	Au	Bi	Cu	Mo	Pb	Sb	W	Zn
区域背景值	0.073	11	1.3	0.3	23	0.5	23	0.9	1.9	73
平均值 X_1	0.18	64.13	13.28	0.44	37.00	1.15	29.06	4.89	3.89	83.74
背景值 X_2	0.10	36.07	4.96	0.37	31.19	0.92	25.68	2.73	2.73	80.70
C_{v1}	1.74	1.56	2.55	1.59	2.57	1.02	0.81	1.91	1.72	0.58
C_{v2}	0.70	0.81	1.09	0.36	0.49	0.46	0.35	0.88	0.45	0.39
S_1	0.31	100.02	33.89	0.70	94.92	1.17	23.43	9.36	6.68	48.31
S_2	0.07	29.04	5.39	0.13	15.42	0.42	8.86	2.40	1.24	31.59
叠加强度系数 D	7.90	6.12	16.84	6.28	7.30	3.46	2.99	7.01	7.70	1.59
富集系数 K	1.36	3.28	3.81	1.23	1.36	1.84	1.12	3.03	1.44	1.11

注：1. X_1 、 S_1 、 C_{v1} 为原始数据集平均值、标准离差、变化系数， X_2 、 S_2 、 C_{v2} 为剔除高值后数据集平均值、标准离差、变化系数；2.富集系数 K =背景值/20万区域背景值；3.叠加强度系数 $D=(X_1/X_2) \times (S_1/S_2)$ ；4. Au单位为 10^{-9} ，其它为 10^{-6} 。5.区域背景值参考文献19。

未见Cu独立成矿,可能主要是作为区内已知金矿的伴生元素。②Bi、W含量变异幅度较Cu偏弱,但高强数据多,主要是由工区西侧中川岩体侵位引起,具有较大成矿潜力。③Au、Sb、Ag、As等元素变异幅度较高,有较多的高强度数据。Au为本区的优势成矿元素,强度高,且工作区外围有已知李坝、崖湾、金山等金矿,找矿潜力大,其他元素多为Au的伴生元素异常。Sb、Ag、As等元素部分数据达到本次分析测试的检出上限,个别接近成矿边界品位,在区内也有伴生成矿的可能。④Pb、Zn、Mo等元素变异系数较小,高强度数据少,成矿可能性较低。

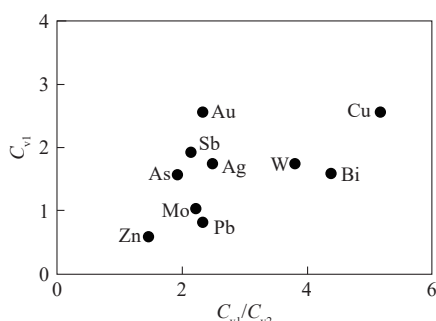


图3 中川地区变异系数散点图

Fig. 3 Scatter plot of variation coefficient in Zhongchuan area

3.3 元素组合特征

元素组合是反映工作区地球化学特征的一种特殊指标,能为地质找矿提供有效的指示,是后续地球化学异常解释和评价的重要依据^[24-25]。R型聚类分析可以直观的表现各元素之间的亲疏关系,定量研究元素之间的聚集和分离,了解各元素在地质环境中的聚集趋势和成因联系,从而揭示区内经历的主要地质活动及地质作用^[26-27]。

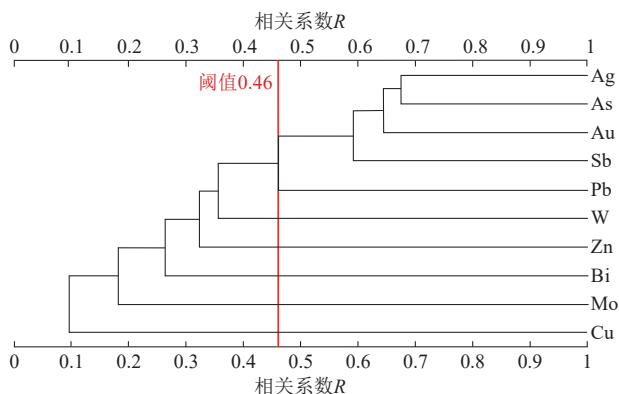


图4 中川地区水系沉积物元素R型聚类分析图谱

Fig. 4 R-type cluster analysis pedigree of stream sediments elements in Zhongchuan area

工作区外围有多处已知金矿探矿权和采矿权,矿权内Au异常与Ag、As、Sb、Pb等元素异常套合均较好。工作区10种元素的R型聚类分析图谱(图4)可见,当相关系数阈值为0.46时,Au、Ag、As、Sb、Pb等亲硫元素可分为1簇,这与邻区已知金矿床元素组合特征类似,可作为寻找区内金矿化线索的重要参考。因此,综合分析本区元素相关系特征和邻区已知金矿元素组合特征选择以0.46作为相关系数的阈值,可将元素组合分为6簇。第I簇为Ag-As-Au-Sb-Pb,此簇为亲硫元素组合,此元素组合可能代表与成矿作用有关的局部元素异常。工作区Au具有较好成矿前景,从聚类分析结果看,该区Ag、As、Sb与Au关系密切,可利用Ag、As、Sb等异常来帮助寻找金矿化线索。第II簇—第VI簇分别对应为W、Zn、Bi、Mo、Cu,此五组元素组合与其它元素相关性较差,背景区反应了该工作区较为单一的元素地球化学属性。W、Bi元素高值区主要集中在中川岩体东部,与工作区北部Au高值区重合度较好,表明上述2簇元素可能为该地区Au异常成矿作用中活化迁移(带出)或沉淀富集(带入)的伴生元素,可利用其高值重合区来帮助寻找金矿化线索。

4 异常圈定

4.1 单元素异常圈定

迭代法是地球化学单元素异常圈定中确定异常下限的传统方法。其原理是利用递推公式或循环算法,不断使用变量旧值推断演算得出新值,从而达到剔除特高值和特低值对整体的影响^[28]。利用迭代法计算异常下限的前提是元素含量数据或者其对数符合或近似正态分布,但实际工作中获得的数据很难满足正态分布,这就要对数据的特异值进行迭代剔除,使其符合或近似正态分布。具体做法如下:1. 剔除原始数据平均值加减三倍标准离差的值($X_1 \pm 3S_1$)的特异值;2. 对剔除后的数据重复上述计算,直至数据没有特异值;3. 计算没有特异值数据的平均值和标准离差,取 $X_2 + 2S_2$ 作为异常下限^[29]。本次工作以迭代法计算结果为基础,参考本区1:20万化探异常下限,最终确定异常下限值。用克里金法对数据进行网格化,以异常下限的1、2、4倍值划分异常外带、中带、内带,圈定各类单元素异常131个(表3)。各元素异常分布特征如图5所示,不同元素异常分

表3 中川地区元素异常分带及单元素异常数量统计表
Table 3 Element anomaly zonation and single element anomaly quantity statistics in Zhongchuan area

元素	Ag	As	Au	Bi	Cu	Mo	Pb	Sb	W	Zn
异常外带	0.3	110	20	0.6	60	1.8	45	7.5	6	140
异常中带	0.6	220	40	1.2	120	3.6	90	15	12	280
异常内带	1.2	440	80	2.4	240	7.2	180	30	24	560
异常个数	15	14	25	8	11	18	5	18	10	7

注：Au单位为 10^{-9} ，其它为 10^{-6} 。

布特征差异较大。

①Au、Ag、As、Sb等四种元素异常强度较高，规模较大，套合较好，均具有三级浓度分带，在调查区西北部面积较大且成连片分布，四种元素异常总体上沿北西向成带状展布，异常中有部分极值点分别达到了其检出上限；在调查区南部，四种元素异常总体上沿东西向断裂成带状或串珠状展布。该地区西部出露中川岩体，且异常区内断裂构造发育，成矿地质条件十分有利，有寻找金矿的潜力。
②W、Bi两种元素异常主要分布在该地区西北部，沿中川岩体东部接触带展布，异常面积大，强度高，都具有三级浓度分带，与Au等元素异常套合



图5 中川地区单元素异常图

Fig. 5 Single element anomaly maps in Zhongchuan area

(1) 第四系冲洪积物；(2) 第四系冲积物；(3) 第四系风成黄土；(4) 麦积山组；(5) 东扎口组；(6) 下家岭组第三岩性段；(7) 下家岭组第二岩性段；(8) 下家岭组第一岩性段；(9) 舒家坝群上岩组；(10) 花岗岩；(11) 地质界线；(12) 逆断层；(13) 性质不明断层；(14) 水系沉积物测量工作范围；(15) 已有矿权；(16) 元素异常浓度分带

较好，W、Bi异常的形成主要与中川岩体有关。
③Mo异常在该地区分布比较广泛，总体延断裂构造方向呈北西西向或东西向展布，与其他元素异常在空间上相关性小，且其异常强度较弱，多只有异常外带或中带；Pb异常在该区内分布较少，高值区多与Au异常重合。
④Cu、Zn等元素异常在该地区零星出露，且异常强度较低，高值不多，大多只有异常外带，找矿潜力有限。

4.2 综合异常圈定

以单元素异常为基础，根据异常规模、异常分布套合情况，结合地区成矿地质条件，将成因类似、空间关系密切的元素组合，圈定为一个综合异常^[30-32]。本次工作共圈定7处综合异常，编号依次为HS1-HS7（图6）。采用相同主元素对比排列法将综合异常进行排序，即将同一主元素的各个综合异常置于一

起，依其评序指数（JOI）由大到小进行评序。

计算方法： $JOI=D \times K \times C$ ，式中D为主元素规格化规模，K为异常内除主元素外特征组合元素的衬度平均值，C为修正系数。

主元素规格化规模 $D=S \times (X-T)$ ，式中S为主元素异常面积，X为综合异常内主元素含量平均值，T为异常下限。

修正系数C由以下几方面特征确定：a. 主元素异常浓度分带的外、中、内带各给1、2、3分；b. 异常组合特征：组合复杂且与主元素密切相关者给3分，组合单一者给1分，介于二者之间给2分；c. 异常套和程度：与主元素异常套和程度好或有一定规律分布者给2分，较好者给1分，不好者给0分；d. 异常与已知矿产吻合程度：完全吻合者给2分；吻合但矿种不一致者给1分；不吻合者给0分；e. 异常分类类别甲1、甲2、乙1、乙2、乙3、丙类分别给5、4、3、2、1、0.5分；f. 异常区的地质、岩浆岩、大地构造位置等条件，对成矿有利

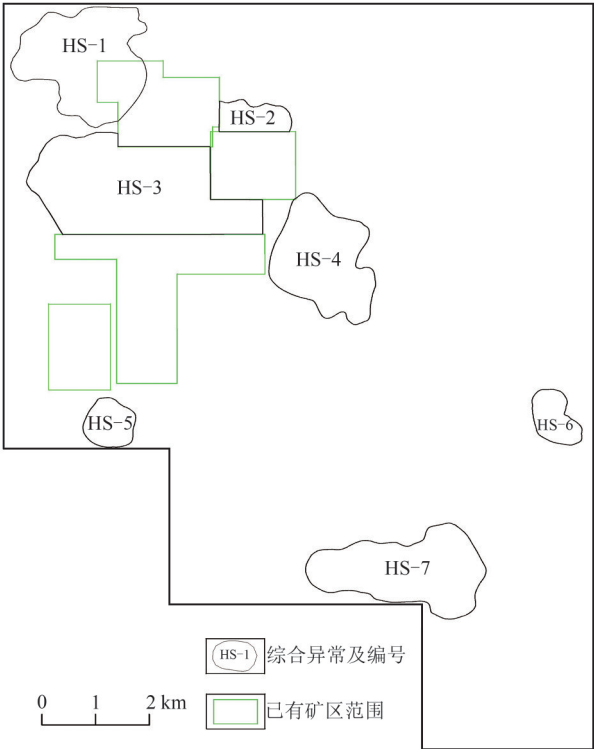


图6 中川地区元素综合异常图
Fig. 6 Element comprehensive anomaly map in Zhongchuan area

者，按其所处条件好、较好、一般者分别给3、2、1分。将各项指标得分累加，以总分的高低给定修正系数值，按>15、15~12、12~9、<9分分别给C赋值1.2、1.0、0.8、0.6参与运算。

通过评序指数（JOI）对比，综合异常排序结果如下（表4）：HS-4综合异常排名第一，HS-3综合异常排名第二，而后排名依次为HS-5、HS-7、HS-2、HS-6、HS-1。HS-4综合异常边部有已知金矿点1处，西北部有已知探矿权和采矿权；HS-3综合异常南北均为已知金矿探矿权，HS-5综合异常为已知金矿区的南部延伸；HS-7综合异常南部有已知探矿权和大垵下金矿采矿权；HS-2综合异常

表4 中川地区综合异常评序表

Table 4 Comprehensive anomaly evaluation in Zhongchuan area

异常编号	异常特征组合		主元素规格化	特征组合平均	修正系数	评序指数	异常排序
	主元素	其它元素	规模(D)	衬度(K)	(C)	(JOI)	
HS-1	Au	Ag-As-Sb-Pb-W-Bi	77.66	2.90	1.2	270.26	7
HS-2	Au	Ag-As-Sb-Pb-Bi-Zn	103.35	3.11	1	321.42	5
HS-3	Au	Ag-As-Sb-W-Bi	252.19	2.31	1	582.56	2
HS-4	Au	Ag-As-Sb-W	201.92	2.44	1.2	591.22	1
HS-5	Au	Ag	30.35	16.67	1	505.93	3
HS-6	Au	Ag-As-Sb-Pb	68.55	4.39	1	300.93	6
HS-7	Au	Ag-As-Sb	122.85	3.12	1	383.29	4

南部为崖湾金矿，西部为岗沟里金矿；HS-6综合异常西部有已知金矿点和锑矿点；HS-1综合异常位于岗沟里金矿向西北方向的延伸，且异常西部为中川岩体。这一评序结果客观的反映了研究区地球化学信息和地质找矿信息，与区内已知情况较相符，表明本次评序是合理的，可作为异常评价、划分找矿远景区和靶区优选的重要依据。

5 异常查证和找矿成效

根据综合异常的分布情况，结合成矿地质条件，选择成矿前景好，有进一步施工空间和成矿规

模可能较大的HS-2、HS-3、HS-6和HS-7综合异常采取地表路线调查、槽探和钻探工程揭露的方式进行查证，圈定含金构造蚀变带4条（编号I-IV）。

5.1 HS-2综合异常

HS-2异常区位于工作区北部，在中川岩体东侧3.5~5 km范围内，紧邻崖湾金矿，异常面积约0.7 km²。出露岩性为泥盆系舒家坝岩群变质砂岩、粉砂质，发育近东西、北西西向断裂，断裂带内闪长岩脉发育，与矿化关系密切。异常区主元素为Au，特征组合为Ag-As-Sb-Pb-Bi，各元素分带清晰，套合性较好（图7）。Au异常极高值为432 ×

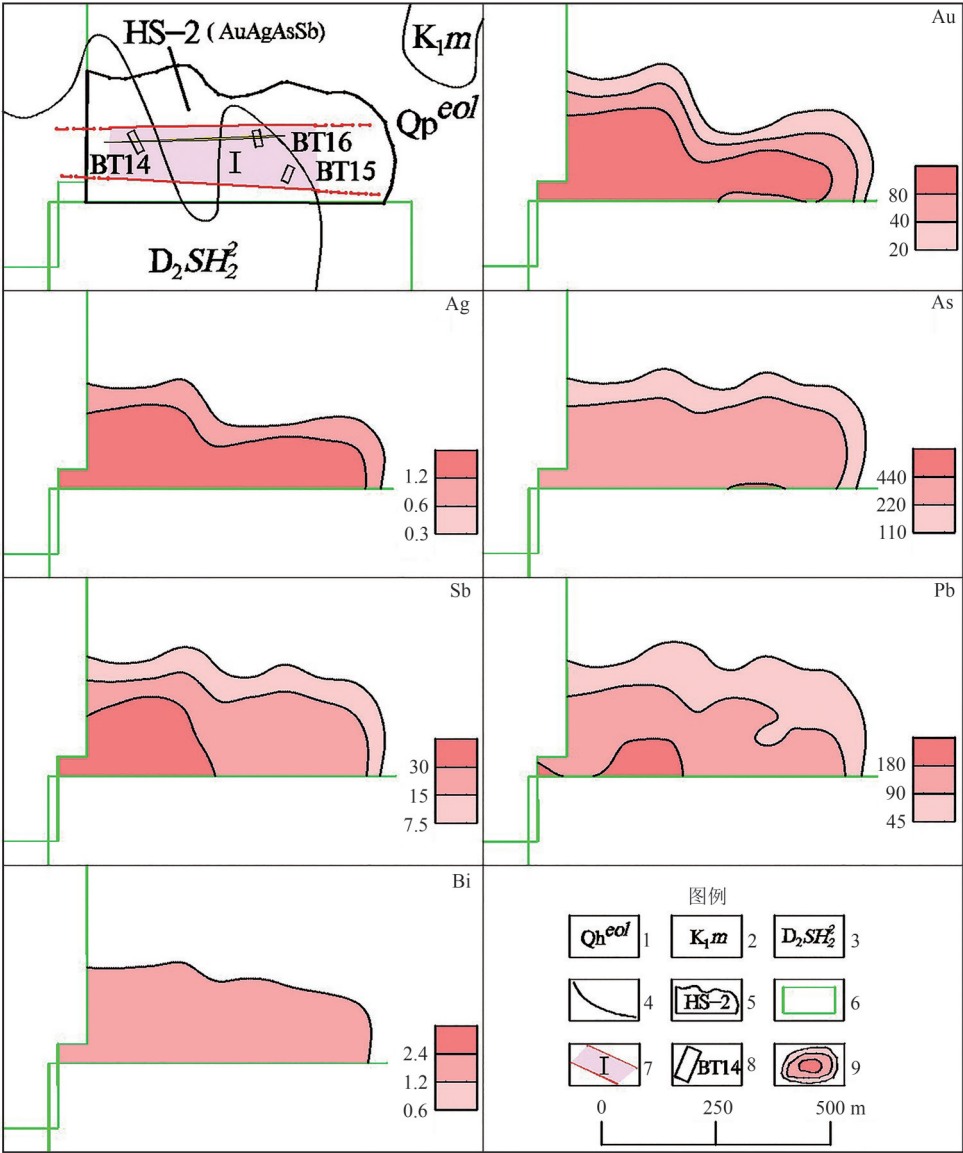


图7 HS-2综合异常剖析图

Fig. 7 Analysis diagram of integrated anomaly of HS-2

(1) 第四系风成黄土；(2) 麦积山组；(3) 舒家坝群上岩组；(4) 地层界线；(5) 综合异常及编号；(6) 已知矿权；(7) 含金构造蚀变带及编号；(8) 槽探位置及编号；(9) 元素异常分带

10^{-9} , 异常面积 0.58 km^2 ; Ag 异常极高值 1.9×10^{-6} , 异常面积 0.47 km^2 ; As 异常极高值 753×10^{-6} , 异常面积 0.71 km^2 。在该异常区开展路线调查, 布设探槽工程4条 (BT14、BT15、BT16), 圈定含金构造蚀变带1条 (I号)。

I号含金构造蚀变带长约 1.5 km , 宽约 200 m , 由多条近平行的断层蚀变带组成, 整体北倾, 走向北东东, 产状 $321^\circ \sim 350^\circ \angle 45^\circ \sim 56^\circ$, 发育北西、北东和近南北向次级断层。蚀变带内金品位 $0.40 \sim 2.16 \text{ g/t}$, 矿化蚀变主要是发育褐铁矿化、硅化、黄铁矿化、毒砂化。其中剥土 BT14 和 BT16 控制金矿体1条, 金矿体沿走向长约 600 m , 金品位 $1.18 \sim 1.24 \text{ g/t}$, 真厚度 $0.74 \sim 0.81 \text{ m}$ 。

5.2 HS-3综合异常

HS-3异常区位于工作区西北部中川地区, 处于中川岩体东接触带外围, 异常面积约 6.1 km^2 。出露岩性主要为石炭系东扎口组粉砂质板岩、变质石英砂岩, 发育北西-北北西向断裂, 该组断裂为中川岩体侵位所形成的环形断裂的一部分。异常区围绕岩体从近到远红柱石堇青石-黑云母热接触变质带, 其中黑云母变质带内金矿化较好, 同时金矿化与中川岩体派生的中酸性岩脉空间关系密切, 多同位产出。异常区主元素为 Au, 特征组合为 Ag-As-Sb-Bi, 该异常元素强度高, 面积大, 以 Au、Ag、As 元素异常最为显著 (图8)。Au 异常极高值为 636×10^{-9} , 异常面积 3.77 km^2 ; Ag 异常极高值

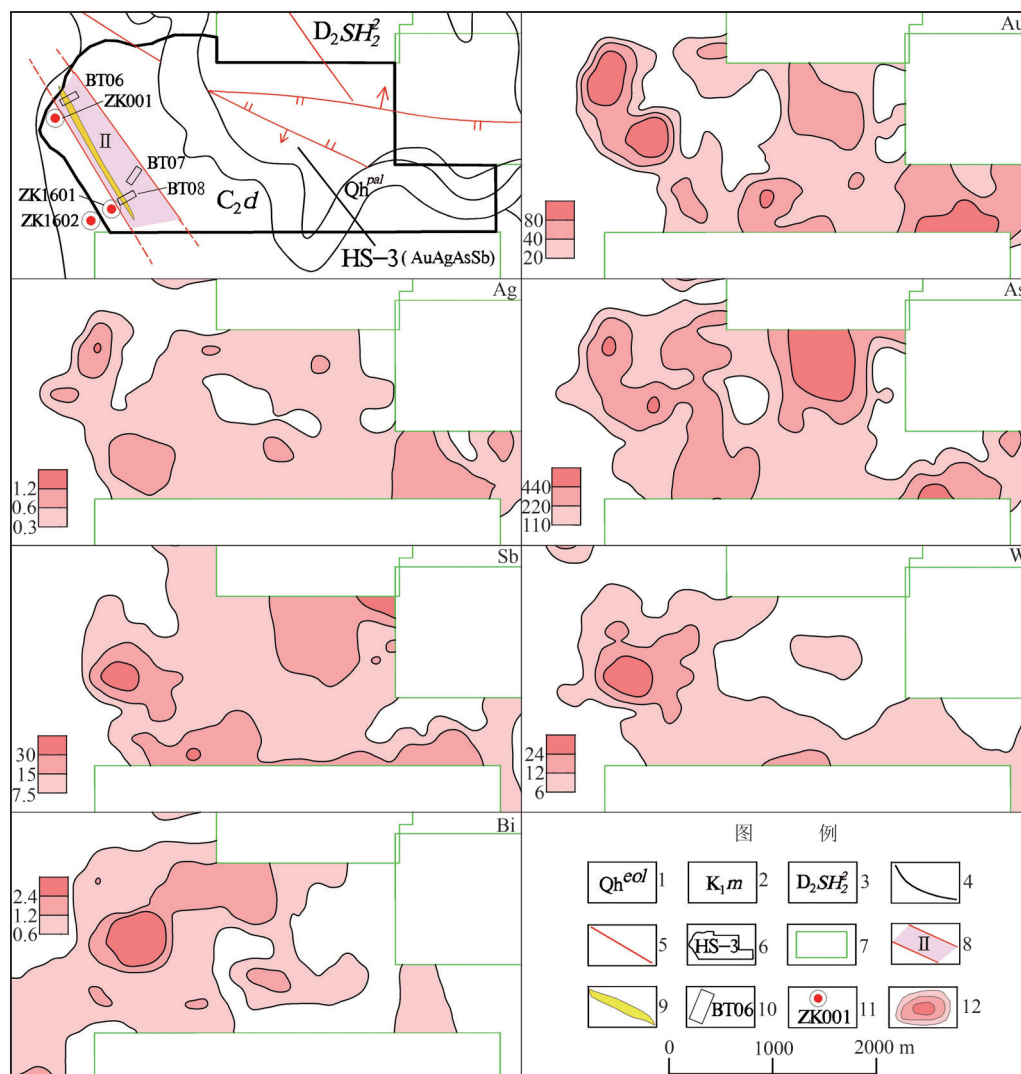


图8 HS-3综合异常剖析图

Fig. 8 Analysis diagram of integrated anomaly of HS-3

(1)第四系风成黄土;(2)麦积山组;(3)舒家坝群上岩组;(4)地层界线;(5)断层;(6)综合异常及编号;(7)已有矿权;(8)含金构造蚀变带及编号;(9)金矿体;(10)槽探位置及编号;(11)钻孔位置及编号;(12)元素异常分带

2.05×10^{-6} , 异常面积 4.31 km^2 ; As 异常极高值 1033×10^{-6} , 异常面积 4.55 km^2 。在该异常区开展路线调查, 布设探槽工程 3 条 (BT06、BT07、BT08)、钻孔 3 个 (ZK001、ZK1601、ZK1602), 圈定含金构造蚀变带 1 条 (Ⅱ号), 金矿体 3 条。参照一般工业指标, 金矿边界品位 0.8 g/t , 最小可采厚度 0.8 m , 矿体按照 $320 \text{ m} \times 320 \text{ m}$ (走向 $\times$ 倾向) 进行外推, 矿石比重参考邻区金山金矿 2.74 t/m^3 对 3 条金矿体潜在资源进行估算, 累计估算金潜在资源 5365 kg , 具有成中型金矿潜力。

Ⅱ号含金矿构造蚀变带地表长约 1.7 km , 宽约 200 m , 走向北北西, 产状 $235^\circ \angle 65^\circ \sim 87^\circ$ 。蚀变带内圈定 1 条金矿化带, 金矿化带长约 770 m , 宽 20.9 m , 金品位 $0.40 \sim 3.89 \text{ g/t}$ 。深部由 3 个钻孔 (ZK001、ZK1601、ZK1602) 控制, 金矿化带内圈定 3 条金矿体 (编号: K-1、K-2、K-3) (图 9), 矿化蚀变主要是发育褐铁矿化、硅化、黄铁矿化、毒砂化。

K-1 号金矿体由 2 条探槽 (BT06、BT08) 和 2 个钻孔圈定 (ZK1601、ZK1602)。金矿体单工程金品位 $0.90 \sim 2.74 \text{ g/t}$, 单工程水平厚度 $0.96 \sim 2.24 \text{ m}$, 块段金平均品位 1.48 g/t , 块段水平厚度 1.41 m , 估算金潜在资源 1955 kg ; K-2 号金矿体由 1 条探槽 (BT06) 和 2 个钻孔圈定 (ZK001、ZK1601)。金矿体单工程金品位 $1.12 \sim 2.04 \text{ g/t}$, 单工程水平厚度 $2.21 \sim 7.00 \text{ m}$, 块段金平均品位 1.50 g/t , 块段水平厚度 4.41 m , 估算金潜在资源 3256 kg ; K-3 号金矿体由钻孔 ZK1601 单工程深部圈定。金品位 1.05 g/t , 单工程水平厚度 1.88 m , 块段金平均品位 1.05 g/t , 块段水平厚度 1.88 m , 估算金潜在资源 154 kg 。3 个矿体累计估算金潜在资源 5365 kg 。

5.3 HS-6 综合异常

HS-6 异常区位于工作区东部, 在中川岩体东侧 10 km 范围内, 异常面积约 0.66 km^2 , 出露岩性主要为石炭系东扎口组变质石英砂岩、粉砂质板岩, 发育北西向断裂, 金矿化严格受构造控制。异常主元素为 Au, 特征元素组合为 Ag-As-Sb-Pb, 各元素分带清晰, 套合较好 (图 10)。Au 异常极高值为 311×10^{-9} , 异常面积 0.51 km^2 ; Ag 异常极高值 2.91×10^{-6} , 异常面积 0.53 km^2 ; As 异常极高值 761×10^{-6} , 异常面积 0.34 km^2 。在该异常区开展路线调查, 布设探槽工程 3 条 (BT03、

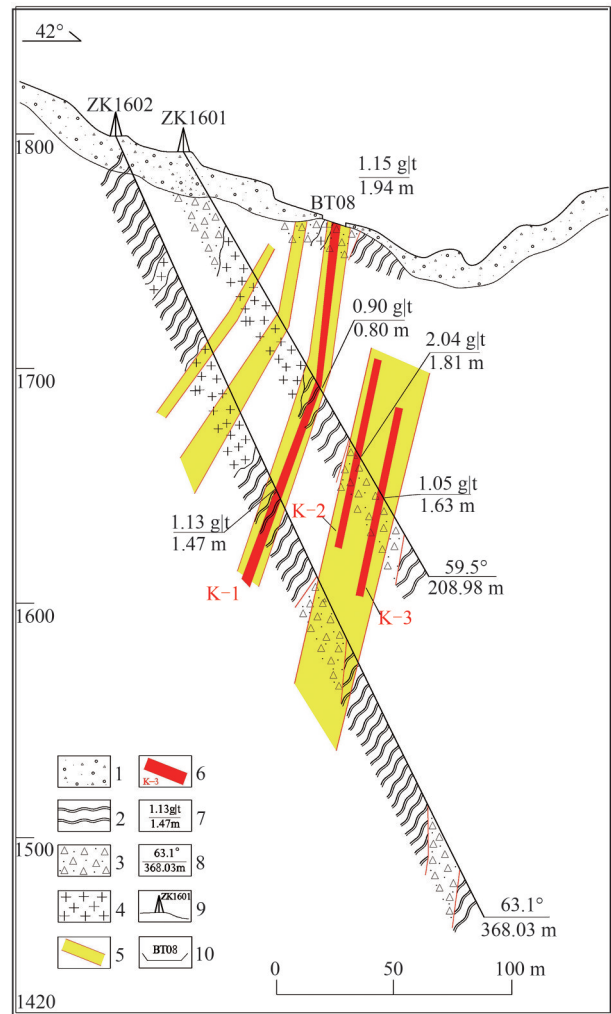


图 9 中川地区 16 号勘探线剖面图

Fig. 9 Section map of 16 exploration lines in Zhongchuan area (1) 残坡积物; (2) 板岩; (3) 断层破碎带; (4) 花岗岩; (5) 含金构造蚀变带; (6) 金矿体及编号; (7) 品位/真厚度; (8) 钻孔倾角/进尺; (9) 钻孔位置及编号; (10) 槽探位置及编号

BT04、BT05), 圈定含金构造蚀变带 1 条 (Ⅲ号)。

Ⅲ号含金矿构造蚀变带长约 1 km , 宽约 100 m , 走向北西向, 发育北西向次级断裂构造, 局部发育有近南北向次级断层, 复式背向斜以及逆冲断层与褶皱构造叠加。含金构造蚀变带内圈定 1 条金矿化带, 长约 900 m , 宽 $5 \sim 10 \text{ m}$, 产状 $7^\circ \sim 25^\circ \angle 68^\circ \sim 74^\circ$, 局部产状 $355^\circ \angle 68^\circ$, 块样金品位 $0.28 \sim 2.84 \text{ g/t}$, 矿化蚀变主要有褐铁矿化、绢云母化、硅化、碳酸盐化等。

5.4 HS-7 综合异常

HS-7 异常区位于工作区南部, 在中川岩体东侧 $7 \sim 10 \text{ km}$ 范围内, 异常面积约 3.65 km^2 。出露岩性主要为石炭系下家岭组变质石英砂岩、粉砂质千枚岩、泥质粉砂质板岩, 发育北西-近东西

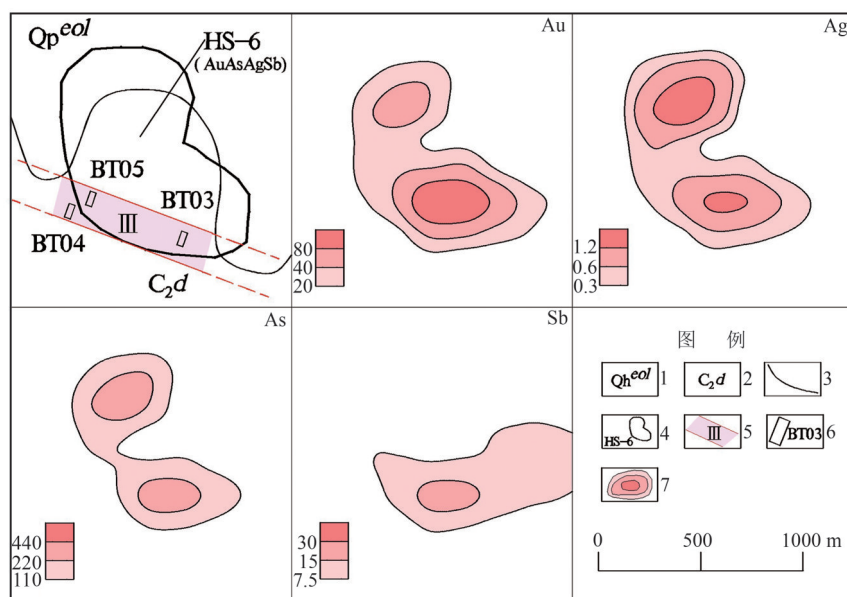


图10 HS-6综合异常剖析图

Fig. 10 Analysis diagram of integrated anomaly of HS-6

(1) 第四系风成黄土;(2) 东扎口组;(3) 地层界线;(4) 综合异常及编号;(5) 含金构造蚀变带及编号;(6) 槽探位置及编号;(7) 元素异常分带

向断裂, 金矿化主要发生在断层破碎带内。异常特征元素组合为Sb-As-Ag, 异常面积大, 套合性较好(图11)。Au异常极高值为 334×10^{-9} , 异常面积 3.32 km^2 ; Sb异常极高值 258×10^{-6} , 异常面

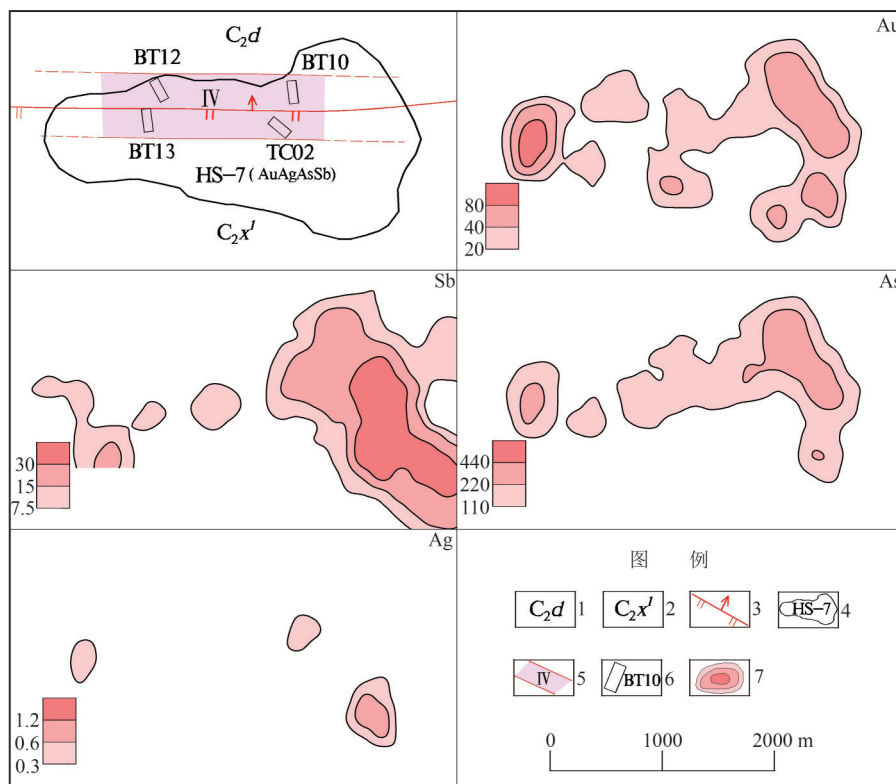


图11 HS-7综合异常剖析图

Fig. 11 Analysis diagram of integrated anomaly of HS-7

(1) 东扎口组;(2) 下家岭组第一岩性段;(3) 逆断层;(4) 综合异常及编号;(5) 含金构造蚀变带及编号;(6) 槽探位置及编号;(7) 元素异常分带

IV号含金矿构造蚀变带长约3 km, 宽约100 m, 走向北西西, 发育北西西向次级构造, 构造片理化发育。含金构造蚀变带内圈定1条金矿化带(KHIV), 长约1.5 km, 宽5~8 m, 拣块样金品位1.09~1.36 g/t, 地表由2个探槽控制(BT10、TC02), 矿化蚀变主要有褐铁矿化、硅化、绢云母化、碳酸盐化等。

6 结 论

(1) 工作区内Au、As、Sb等3种元素富集明显; Au、Sb、Ag、As、Cu等元素变化幅度较高, 有较多的高强度数据; 聚类分析指示Au与Ag、As、Sb关系密切。工作区周边仅发现Au矿床(点), 表明该区Au、Ag、As、Sb等元素具有成矿相关性, Ag、As、Sb等元素异常是找Au的有利标志。

(2) 通过开展1:2.5万水系沉积物测量, 结合本区成矿地质背景, 在该区圈定各类单元元素异常131个, 综合异常7个, 综合异常均以Au为主要元素。

(3) 优选4处综合异常, 通过开展路线地质调查、槽探和钻探工程验证, 圈定含金构造蚀变带4条, 在中川地区(HS-3)圈定金矿体3条, 累计估算金潜在资源5365 kg, 取得较好找矿成果。

(4) 1:2.5万水系沉积物测量可以在该区快速缩小找矿靶区, 提供重要地质信息, 支撑实现找矿新发现。该方法为邻区或相似景观区开展地球化学测量工作提供借鉴。

参考文献:

- [1] 张国伟, 郭安林, 姚安平. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 23–31.
- [2] 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等. 关于秦岭造山带[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 746–768.
- [3] 马东阳, 郭东宝, 牛永杰, 等. 西秦岭成矿带甘肃段金矿床成矿作用与分布特征[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(3): 550–565.
- [4] 陈衍景. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 854–865.
- [5] 郭娜, 刘翠, 崔龙, 等. 西秦岭岷礼成矿带马坞金矿致矿火成岩组合与成矿地质背景[J]. 现代地质, 2020, 34(6): 1261–1276.
- [6] 杨尚松. 西秦岭中川地区中酸性岩浆活动与金成矿作用研究[J]. 中国地质大学(北京), 2017.
- [7] 王学求. 勘查地球化学80年来重大事件回顾[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 322–330.
- [8] 奚小环, 李敏. 中国区域化探若干基本问题研究: 1999–2009[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 267–282.
- [9] 马文君, 谢海林, 李少南, 等. 地球化学测量方法在东昆仑茫崖河东金矿中的应用及找矿效果[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(4): 717–734.
- [10] 蒲访成. 甘肃省礼县李坝金矿床地质特征及矿体赋存规律[J]. 甘肃冶金, 2018, 40(5): 59–63, 68.
- [11] 包随成. 甘肃省礼县金山金矿床矿石特征及找矿标志[J]. 甘肃冶金, 2009, 31(2): 42–43, 57.
- [12] 马承, 宋伊圩, 孙彪, 等. 西秦岭岷礼成矿带地球化学特征及其地质意义[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(4): 489–499.
- [13] 王建中, 赵玉梅, 钱壮志, 等. 甘肃岷—礼成矿带钨矿地质特征及找矿方向[J]. 华东地质, 2017, 38(4): 296–305.
- [14] 谭洪波. 甘肃金山、马泉金矿床成因类型及其对比研究[J]. 西北地质, 2009, 42(4): 1–10.
- [15] 柯昌辉, 王晓霞, 杨阳, 等. 西秦岭地区脉岩成因与金成矿关系—来自李坝金矿年代学、地球化学及Nd–Hf–S同位素的约束[J]. 矿床地质, 2020, 39(1): 42–62.
- [16] 张国宾, 杨言辰, 梁冰, 等. 黑龙江东部完达山地区水系沉积物地球化学特征及成矿预测[J]. 中国地质, 2017, 44(3): 588–603.
- [17] 高永伟, 郭周平, 赵辛敏, 等. 青海北祁连冷龙岭地区水系沉积物元素地球化学特征及异常圈定[J]. 现代地质, 2018, 32(3): 468–480.
- [18] 陈炳锦, 郑崔勇, 赵亮亮, 等. 土壤地球化学测量在陕西勉县瓦子坪铅锌多金属矿勘查中的应用[J]. 现代地质, 2021, 35(2): 455–465.
- [19] 刘盛昌. 岷县幅1:48–15 1/20万地球化学图说明书[R]. 兰州: 甘肃省地矿局化探队四分队, 1992.
- [20] 陈力子, 刘满年, 杨拴海, 等. 秦昆结合部塔秀—曲什安地区水系沉积物测量地球化学特征及找矿方向[J]. 物探与化探, 2015, 39(5): 897–903.
- [21] 黄啸坤, 魏俊浩, 石文杰, 等. 基于汇水盆地的化探异常识别与评价: 以东昆仑乌拉斯太地区1:5万水系沉积物地球化学测量为例[J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 324–338.
- [22] 尹国良, 梁科伟, 杨福深, 等. 黑龙江省卫星—安全地区水系沉积物测量地球化学特征及找矿方向[J]. 物探与化探, 2017, 41(3): 402–409.
- [23] 李进, 韩世强, 袁赞斐, 等. 土壤地球化学测量在热带雨林景观区锰金矿区的应用—以加纳雅卡锰金矿区为例[J]. 地质与勘探, 2025, 61(5): 999–1005.
- [24] 张嘉升, 周伟, 李伟良, 等. 陕西简池镇地区1:2.5万水系沉积物测量地球化学特征及找矿潜力[J]. 物探与化探, 2023, 47(3): 659–669.
- [25] 张伟, 安茂国, 王志鹏, 等. 青海省那陵格勒河中游地区水系沉积物地球化学特征及找矿远景[J]. 现代地质, 2023, 37(3): 690–707.
- [26] 于俊博, 宋云涛, 郭志娟, 等. R型聚类分析在区域化探元素分组中的作用探讨[J]. 物探化探计算技术, 2014, 36(6): 771–776.

- [27] 田跃斌, 张涛, 杨青云, 等. R型因子分析在水系沉积物测量地球化学分区中的应用—以浙西北地区为例[J]. 黄金科学技术, 2013, 21(3): 48–54.
- [28] 梁明建, 张武饰, 黄锐, 等. 多种方法确定土壤地球化学异常下限的对比—以广西宾阳县七星山调查区为例[J]. 华南地质, 2025, 41(3): 541–557.
- [29] 杨用彪, 曹积飞, 王丽娟, 等. 岩性分区异常下限衬值法圈定化探异常的优劣: 以江苏金山地区为例[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 318–325.
- [30] 唐龙元, 陈孝聪, 王锋, 等. 新疆阿尔泰多拉纳萨依金矿外围土壤地球化学特征及找矿预测[J]. 地质与勘探, 2025, 61(5): 976–988.
- [31] 刘学亮, 李红飞, 胡俊, 等. 内蒙古凉城大西湾地区土壤地球化学特征及找矿潜力分析[J]. 地质找矿论丛, 2025, 40(3): 397–407.
- [32] 郭小刚, 路万全, 周宏, 等. 甘蒙北山四道梁南钼矿土壤地球化学异常特征及找矿潜力分析[J]. 地质与勘探, 2023, 59(4): 774–790.