

# 湖南省桃源县沅水以南地区土壤地球化学特征及找矿预测

贾朋远\*, 贺晨骋

湖南省地质调查所, 湖南 长沙

收稿日期: 2024年1月19日; 录用日期: 2024年4月15日; 发布日期: 2024年4月24日

## 摘要

桃源县沅水以南地区位于雪峰弧形构造隆起带中段转折部位, 成矿地质条件优越。通过研究区1:50000土壤地球化学数据多元统计分析, 发现Au、Hg、Sb、W具有较强的找矿潜力。运用含量-面积分形方法确定Au、Hg、Sb、W异常下限值分别为40 ng/g、1 μg/g、10 μg/g、20 μg/g。单元素异常和组合异常分析显示, 研究区金矿有两种类型, 一种是冷家溪型金矿, 主要特征是以Au异常为主, Hg、Sb异常吻合度高, 为前缘晕指示元素组合, W异常弱, 矿产类型以金矿为主。另一种是西安型金矿, 主要特征是以W异常为主, Au异常中等, Hg、Sb异常弱, 矿产类型以钨矿为主, 金矿为辅。通过分析西安钨金矿区、冷家溪金矿区矿床地质特征, 总结成矿富集规律, 圈定了3个找矿靶区, 实证显示雷打岭附近致矿异常较好, 具备较强的找矿潜力。

## 关键词

土壤地球化学, 聚类分析, 因子分析, 分形, 异常下限, 单元素异常, 组合异常

# Soil Geochemical Characteristics and Mineral Exploration Prediction in the Area South of the Yuanshui River in Taoyuan County, Hunan Province

Pengyuan Jia, Chencheng He

Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha Hunan

Received: Jan. 19<sup>th</sup>, 2024; accepted: Apr. 15<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 24<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

## Abstract

The area south of Yuanshui in Taoyuan County is located at the turning point of the Xuefeng arc-shaped structural uplift belt, with superior ore-forming geological conditions. Through multivariate statistical analysis of 1:50000 soil geochemical data in the study area, it was found that Au, Hg, Sb, and W have strong prospecting potential. Using the content area fractal method to determine the lower limit values of Au, Hg, Sb, and W anomalies as 40 ng/g and 1, respectively  $\mu\text{g/g}$ , 10  $\mu\text{g/g}$ , 20  $\mu\text{g/g}$ . The analysis of single element anomalies and combination anomalies shows that there are two types of gold deposits in the study area. One is the Lengjiayi type gold deposit, which is mainly characterized by Au anomalies, high consistency of Hg and Sb anomalies, and a combination of leading edge halo indicator elements. The W anomaly is weak, and the mineral type is mainly gold deposits. Another type is the Xi'an type gold deposit, which is mainly characterized by W anomalies, moderate Au anomalies, weak Hg and Sb anomalies, with tungsten deposits as the main mineral type and gold deposits as auxiliary. By analyzing the geological characteristics of the tungsten gold deposit in Xi'an and the Lengjiayi gold deposit, summarizing the ore-forming enrichment laws, and delineating three prospecting target areas, empirical evidence shows that the ore-forming anomalies near Leidaling are good and have strong prospecting potential.

## Keywords

Soil Geochemistry, Cluster Analysis, Factor Analysis, Fractal, Abnormal Lower Limit, Single Element Anomaly, Combination Anomaly

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

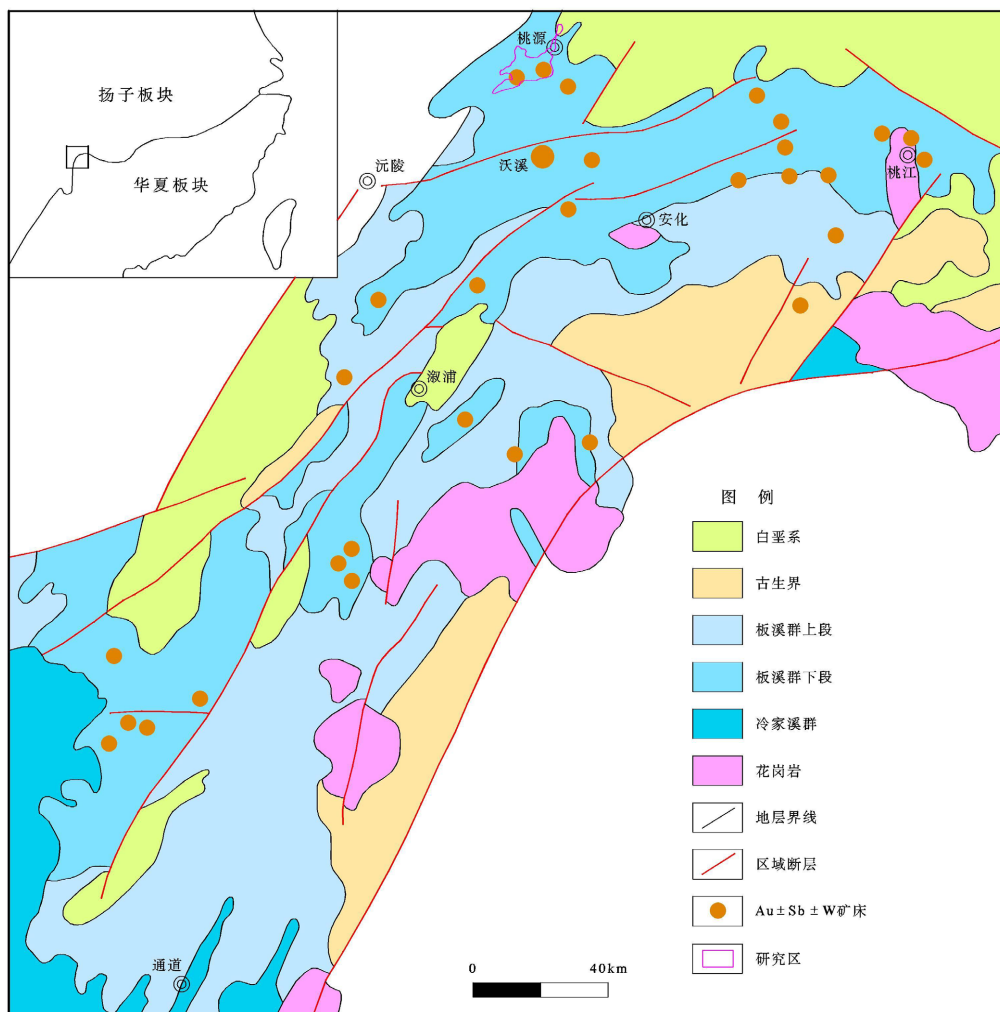
雪峰弧形构造隆起带位于扬子板块与华夏板块之间的过渡地段, 大致沿通道 - 安化 - 桃江一线呈北西凸出的弧形展布, 其在湖南境内延长约 600 km, 宽可达数十千米(图 1)。雪峰弧形构造隆起带是华南重要的金成矿带, 湖南省已有的金矿床(点)约 80%分布于该区冷家溪群和板溪群浅变质岩中[1]。桃源县沅水以南地区(以下称研究区)位于雪峰弧形构造隆起带的转折部位, 在研究区周边先后发现沅陵县沃溪金锑钨矿床、安化县符竹溪金锑矿床、桃江县板溪锑矿床等。上世纪 60~70 年代研究区先后进行了多次地质勘查工作, 圈出金、锑、钨重砂异常数十处, 发现了西安钨金矿[2][3]、冷家溪[4][5]、小桃源[6]、马家坡[7]等小型金矿, 另外还有数十个金矿(化)点。

上世纪 80 年代以来, 许多专家和学者对研究区及周边矿床的成矿物质来源、成矿时代、矿区构造等方面的问题, 提出了许多不同的见解和观点。成矿物质来源目前主要有三种观点: 鲍振襄[8]认为赋矿围岩即矿源层; 彭建堂[9]认为成矿物质主要来源于下伏更成熟的陆壳基底; 毛景文[10]则认为成矿物质一部分来源于中晚元古宙地层, 另一部分来自深部或燕山期花岗岩体。成矿时代认识争议较大, 譬如关于沃溪金矿成矿时代, 顾雪祥[11]认为形成于新元古代雪峰期, 彭建堂[9]认为形成于加里东期, 彭渤[12]认为形成于中生代, 李彬[13]认为形成于燕山期的两阶段幕式成矿作用。关于矿区构造, 目前的主要认识是该区处于雪峰弧形构造带北东段, 是一个多期叠加的变形带, 矿床受韧性剪切带、节理裂隙带、劈理化带和褶皱构造带等控制明显[14][15]。

前人研究侧重于矿点、矿区等大比例尺的工作, 中比例尺成矿预测方面的工作较为薄弱。研究区为侵蚀剥蚀低山—丘陵地貌, 植被茂盛, 基岩出露较差, 地表较难发现矿化信息, 土壤地球化学测量对于植被覆盖区找矿或寻找隐伏矿床有很好效果[16][17][18]。为了明确研究区资源潜力, 湖南省地质调查所开展了 1:50000 土壤地球化学测量(重点矿区加密至 1:10000)。本次研究基于土壤地球化学测量扫面成果, 采用含量—面积分形法确定土壤地球化学异常, 结合地质背景对异常进行评价, 圈定找矿靶区, 以推进该区地质找矿工作取得新突破。

## 2. 区域地质背景

### 2.1. 地层与岩浆岩



**Figure 1.** Geological and mineral distribution diagram of the Xuefeng arc-shaped structural uplift zone  
**图 1.** 雪峰弧形构造隆起带地质及矿点分布简图

研究区出露的地层有新元古界冷家溪群、板溪群、南华系, 下古生界寒武系, 上古生界中泥盆统、中上石炭统, 中生界白垩系和新生界第三系、第四系(图 2)。冷家溪群主要出露于西南部木旺溪、牯牛山一带, 东部向阳村、西北部竹园村一带零星出露, 为浅海相变质砂泥质碎屑岩建造。板溪群在研究区南部广泛分布, 为浅海相变质砂泥质、凝灰质碎屑岩建造。南华系在铁山溪村、沙堤村一带呈带状分布,

为含砾砂岩、冰碛砾岩建造。震旦系、寒武系毗邻南华系分布, 为硅质岩、碳质页岩建造。上古生界泥盆系、石炭系在研究区中部羯羊铺村零星出露, 范围很小。中生界白垩系发育完整, 在研究区中部、北部广泛分布, 为河湖相沉积。新生界分布在沅水两侧, 为河流沉积。

岩浆岩出露于茶庵铺镇北西方向的走马岗和梅子溪两处, 为辉绿岩脉群。走马岗有辉绿岩小岩体 12 个, 呈雁行状排列; 梅子溪出露辉绿岩体 2 个。辉绿岩脉侵入于新元古界地层中, 一般长 1000~1500 m, 宽 30~50 m, 呈岩床和岩墙产出, 常见分支复合现象。

## 2.2. 构造

研究区处于雪峰隆起的东北端及中-新生代洞庭凹陷的西南角, 影响较大的构造运动有武陵运动、雪峰运动、加里东运动和燕山运动。按构造线展布方向可分为东西向构造、北东向构造、北北东向构造等, 研究区以东西向构造、北东向构造为主, 构造线总体方向为 60°~90°。东西向构造由一系列走向大致平行的北东-东西向压扭性断裂和褶皱组成, 该构造带控制了区内金矿床的形成, 是省内重要的金矿成矿远景区。北东向构造由一系列大致互相平行的压性、压扭性断裂和韧性剪切带组成。

## 2.3. 矿产

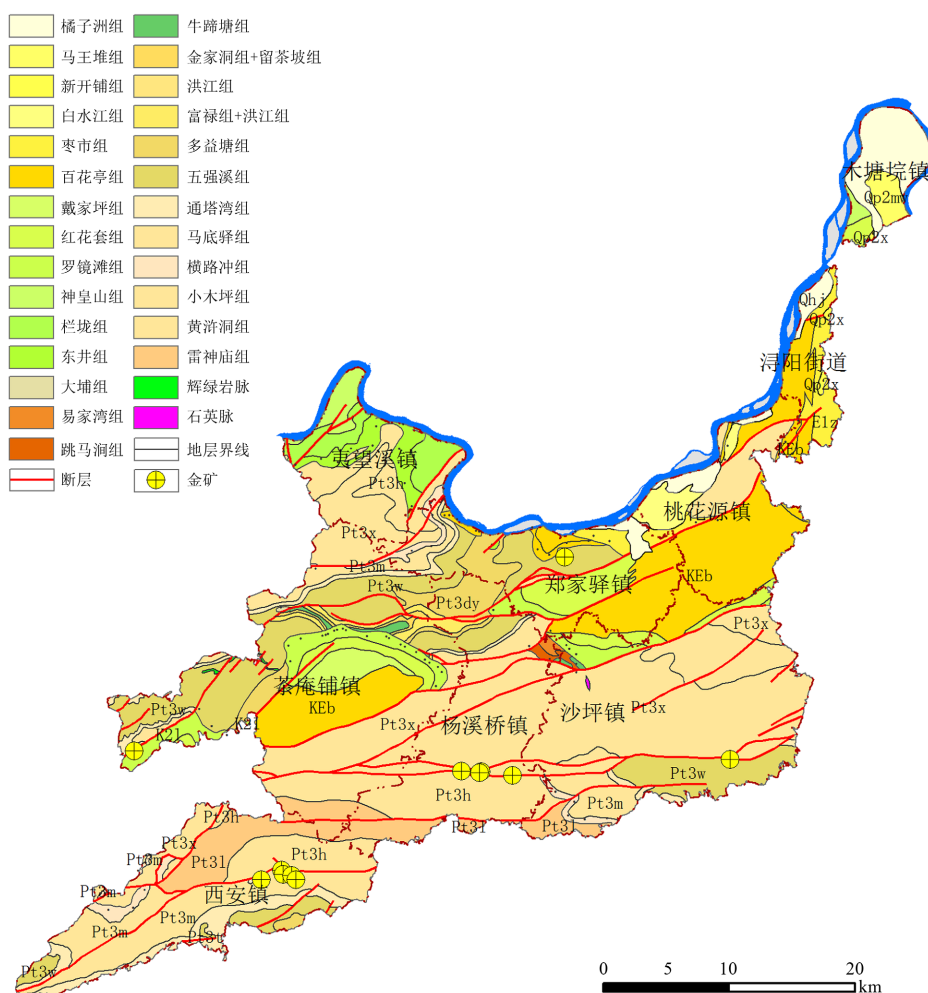


Figure 2. Geological and mineral resources map  
图 2. 研究区地质矿产图

研究区矿产资源丰富, 主要有石煤、铁、钒、铜、铅、锌、白钨、铋、金、黄铁矿、重晶石、金刚石等十多种。金矿是区内的优势矿产, 岩金以冷家溪、小桃源、西安、沙坪、寺坪等金矿点组成东西向成矿带。砂金一般沿沅江河床、第四系砂砾层分布。另外, 沿东西向西安溪压性断裂带有一条白钨矿带分布, 西起磨子坪, 向东经西安溪直到桃安, 长约 15 km。

### 3. 样品采集与测试方法

调查区总面积 1477.33 km<sup>2</sup>, 共采集测试了 2193 个面积性土壤样品(图 3)。其中, 农用地面积 202.55 km<sup>2</sup>, 实际采样 1148 个, 采样密度 5.67 个/km<sup>2</sup>。林地面积 1152.47 km<sup>2</sup>, 实际采样 1031 个, 采样密度 0.89 个/km<sup>2</sup>。其他用地(采矿用地、空闲地、裸土地等) 3.26 km<sup>2</sup>, 实际采样 14 个, 采样密度 4.29 个/km<sup>2</sup>。

样品采集按照多目标区域地球化学调查规范执行, 在布设采样点周围 20 米范围内采用梅花形布点法(平缓区)或蛇形布点法(低山丘陵区)等量采集 5 个子样组成一个样品。农用地采集地表至 20 cm 深处的土柱, 林地、园地采集深度 0~60 cm, 采集时去除杂草、草根、砾石、砖块、肥料团块等杂物。

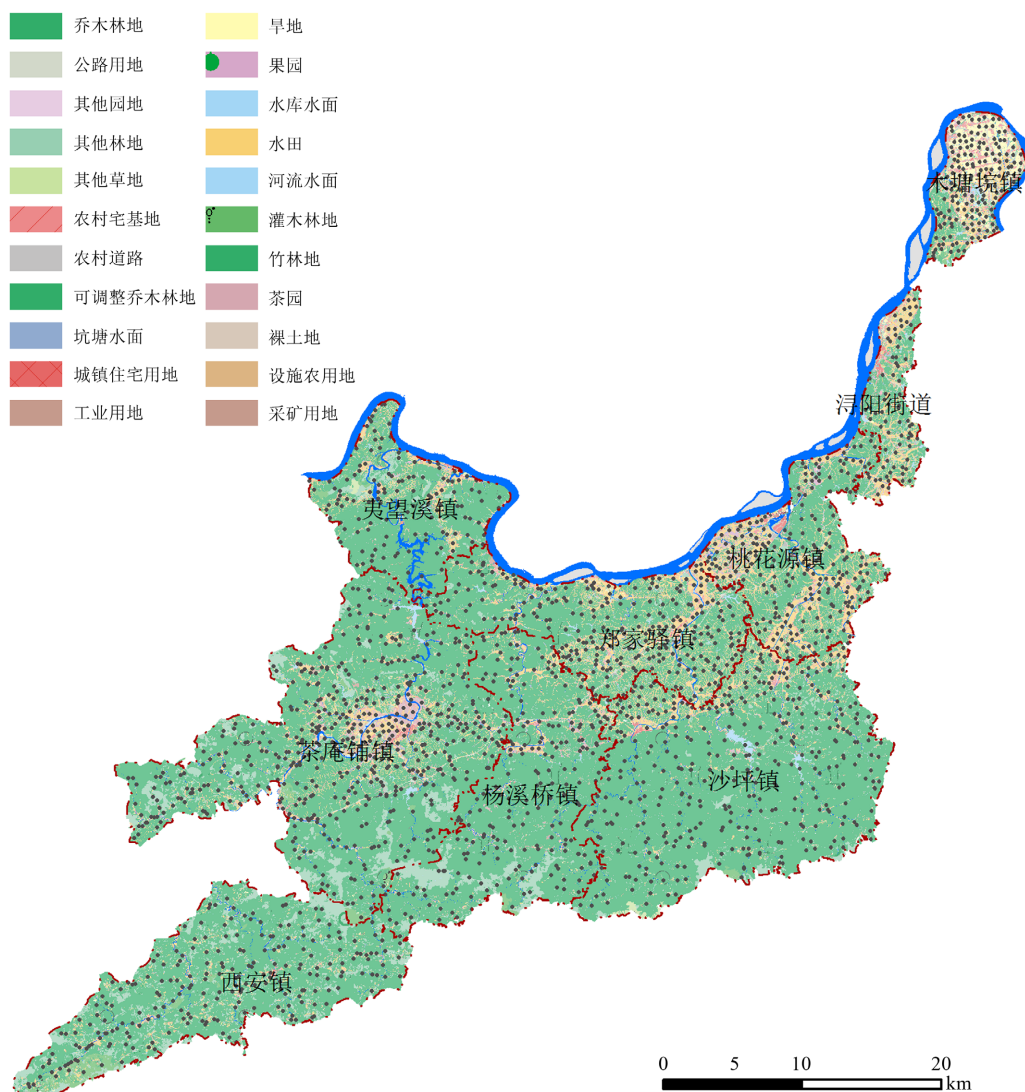


Figure 3. Land use status and sampling point map  
图 3. 研究区土地利用现状及采样点位图

样品加工按照《土地质量地球化学评价规范(DZ/T 0295-2016)》执行, 样品检测由湖南省地质调查所测试中心(具备中国地质调查局多目标地球化学调查样品测试能力(54项)资质)完成, 检测过程依据《区域地球化学样品分析方法(DZ/T 0279-2016)》执行。该项目测定了 Au、Ag、Sb、W、As、Pb、Zn、Cu、Mn、Mo、Hg、Cr、Ni 等元素。其中 Cu、Mn、Mo、Pb、Zn、Ni、Cr 采用电感耦合等离子体发射光谱法测定, Au、Sb、W 采用电感耦合等离子体质谱法测定, Ag 采用垂直电极—发射光谱法测定, As 采用氢化物发生—原子荧光光谱法测定, Hg 采用蒸气发生—冷原子荧光光谱法测定。

## 4. 统计结果

### 4.1. 成矿元素的统计特征

运用 SPSS 软件的描述性统计功能对数据进行统计, 统计参数包括最大值、最小值、极差、平均值、中位数、标准差、方差、变异系数、偏度、峰度等。统计结果见表 1。

**Table 1.** Statistical results of soil metallogenic elements (n = 2193)

**表 1.** 土壤成矿元素统计结果(n = 2193)

元素	最大值	最小值	极差	平均值	中位数	标准差	方差	变异系数(%)	偏度	峰度
Au	2418	0.32	2417.68	7.04	1.6	60.4	3648.08	857.41	30.67	1169.77
Ag	4.7	0.02	4.68	0.08	0.08	0.11	0.01	135.5	33.59	1335.02
Sb	130	0.33	129.67	2.39	1.85	3.23	10.43	135.03	28.87	1116.28
W	761.47	0.24	761.23	4.21	2.16	21.05	442.91	499.68	25.15	814.7
As	1071	1.15	1069.85	10.55	8.58	23.52	553.3	222.86	41.89	1886.72
Pb	1460.55	5.01	1455.53	37.68	33.52	39.21	1537.37	104.06	24.15	810.22
Zn	570.93	15.24	555.69	97.56	95.89	34	1156.25	34.85	3.92	42.87
Cu	237.08	4.06	233.02	29.9	26.61	13.95	194.73	46.67	3.51	34.12
Mn	8063.6	47.5	8016.1	696.2	524.9	544.9	296952.7	78.27	3.21	28.38
Mo	81.46	0.1	81.36	1.09	0.84	2.55	6.5	234.63	23.19	618.77
Hg	21.86	0.01	21.85	0.16	0.11	0.5	0.25	322.97	37.33	1586.81
Cr	183.56	15.45	168.11	79.92	78.83	24.47	598.83	30.62	0.24	-0.19
Ni	102.81	6.03	96.78	30.75	30.31	9.44	89.15	30.7	0.43	1.73

注: Au 单位 ng/g, 其它元素为  $\mu\text{g/g}$ , 下同。

变异系数( $C_v$ )主要描述元素分异特征, 变异系数大, 表明元素在某一地区或某种地质体中的分布分配不均匀, 离散程度大, 易于活动迁移形成矿(化)体或强异常; 变异系数小, 表明元素分布分配较均匀, 离散程度小, 多形成弱异常或低背景, 一般仅具有某种地质意义, 元素本身找矿意义不大。本次研究将变异程度分为 4 种类型:  $C_v < 30\%$  为均匀分布,  $30\% \leq C_v < 60\%$  为弱分异,  $60\% \leq C_v < 100\%$  为较强分异,  $C_v \geq 100\%$  为强分异。针对原始数据的变异系数, 参照这一分类标准显示, Au、W、Hg、Mo、As、Ag、Sb、Pb 为强分异, Mn 为较强分异, Cu、Zn、Ni、Cr 为弱分异。

原始数据的变异系数为  $C_{v1}$ , 采用 3 倍标准差法(平均值  $\pm$  3 倍标准差)处理异常值后的变异系数为  $C_{v2}$ ,  $C_{v1}/C_{v2}$  的比值可以反映数据处理时对特高值特低值的削平程度[19]。运用  $C_{v1}$  和  $C_{v1}/C_{v2}$  制作元素

变异系数散点图, 可以对元素的成矿性进行评价[20]。由图 4 可以看出, Au、W 高值多, 分异强, 成矿的可能性较大; Hg、Mo、As、Ag、Sb、Pb 高值较多, 分异较强, 具有一定的成矿潜力; Mn、Cu、Zn、Ni、Cr 高值少, 分异弱, 成矿的可能性小。

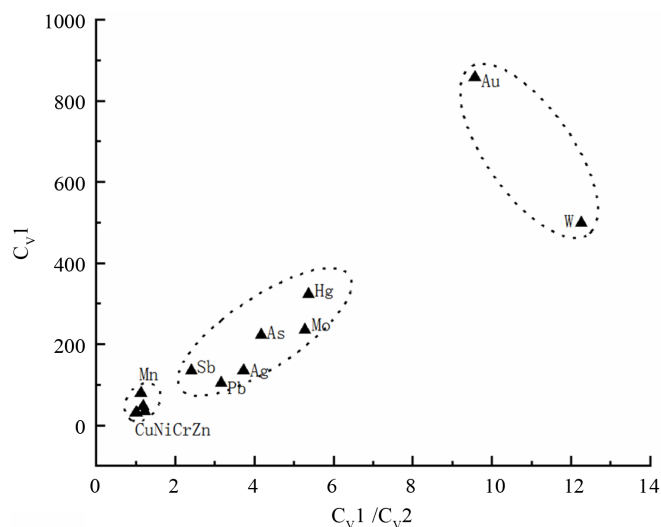


Figure 4. Scatter plot of element variation coefficient  
图 4. 元素变异系数散点图

## 4.2. 成矿元素组合特征

### 4.2.1. R 型聚类分析

对于由  $n$  个变量组成的总体, 变量之间有一定的内在联系, 因此可以用相似性系数作为 R 型聚类分析的一种统计量来定量描述各个变量之间的相似程度, 相似性系数越接近 1, 变量之间的相似程度越高[21] [22]。通过 R 型聚类分析可以较好地了解元素间的共生组合关系。

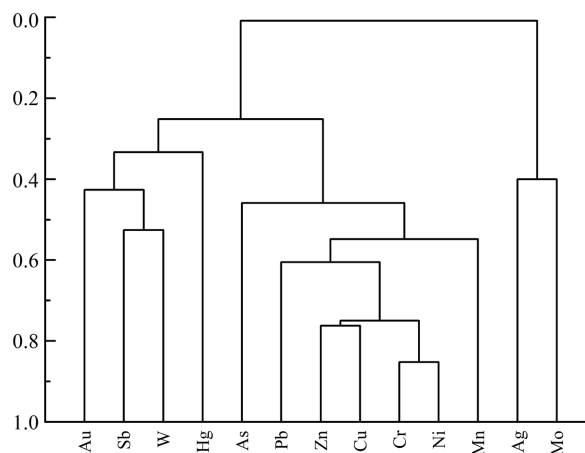


Figure 5. R-type cluster analysis genealogy  
图 5. R 型聚类分析谱系图

从图 5 可以看出, 在  $r = 0.3$  的相似水平上, 13 个元素可明显聚为 3 簇: 第 1 簇为 Au-Sb-W-Hg, 主体由低温元素组成, 表明 Au、Sb、Hg 元素在迁移、富集过程中存在协同关系。在  $r = 0.5$  的相似水平上,

该簇又细分为 Au、Sb-W、Hg 三小簇, 表明 Sb-W 的化学行为相关性更强, 同时伴有高温元素 W, 暗示元素富集与岩浆活动有关, 研究区 Au 成矿温度较高。第 2 簇为 As-Pb-Zn-Cu-Cr-Ni-Mn, 在  $r = 0.7$  的相似水平上, As、Pb、Mn、Zn-Cu-Cr-Ni 形成四簇; 在  $r = 0.8$  的相似水平上, Zn-Cu-Cr-Ni 又细分为 Zn-Cu、Cr-Ni 两小簇, Zn、Cu 为中低温亲硫元素, Cr、Ni 为高温元素, 表明研究区可能存在两次或两次以上的构造—岩浆活动。第 3 簇为 Ag-Mo, 在  $r = 0.2$  的相似水平上, Ag-Mo 与其他元素分为两簇, 表明 Ag-Mo 在迁移、富集过程中具有很强的独立性。

#### 4.2.2. 因子分析

因子分析是作为一种从众多变量数据中提取若干共性因子的多元统计, 能很好地揭示元素的共生组合特点, 为矿床成因和异常解释提供依据[23] [24]。

KMO (Kaiser-Meyer-Olkin)值为检验变量之间相关关系的指标, KMO 指标  $> 0.6$  则表明变量间相关性强, 适合因子分析; Bartlett's 球度检验值表示各变量间的独立性, 其值  $< 0.05$  时适合做因子分析。检验结果显示, KMO 值为 0.826, 大于 0.6; Bartlett 球形检验给出的相伴概率 Sig.为 0.000\*\*\*, 小于显著性水平 0.05, 表明各元素之间具有相关关系, 适合进行因子分析且具有较高的准确性。

以旋转载荷平方和大于 1、累计方差贡献率 68.529%、因子载荷绝对值大于 0.66 为阈值, 可以取出 3 个主因子(表 2), 这 3 个因子(F1、F2、F3)基本反映了区内 13 种元素的地球化学信息。

Table 2. Component matrix after rotation

表 2. 旋转后的成分矩阵

元素	F1	F2	F3
Cu	0.866	0.198	0.019
Ni	0.859	0.189	-0.196
Cr	0.819	0.261	-0.316
Zn	0.818	0.264	0.018
Mn	0.771	-0.053	-0.079
Pb	0.711	0.270	0.273
As	0.670	0.060	0.369
W	0.329	0.752	-0.185
Au	0.111	0.741	-0.125
Hg	-0.075	0.683	0.387
Sb	0.312	0.667	0.221
Mo	0.227	0.003	0.798
Ag	-0.314	0.054	0.773
方差贡献率(%)	36.541	17.845	14.144
累积方差贡献率(%)	36.541	54.386	68.529

因子 F1 的方差贡献率为 36.541%, Cu、Ni、Cr、Zn、Mn、Pb、As 有较高的正载荷。Cu、Zn、Mn、Pb、As 高值区与冷家溪群、板溪群、南华系等老地层高度重合, 低值区与白垩系、第三系、第四系等中生代地层高度重合。Ni、Cr 高值区近东西向, 与区内断裂走向重合。说明 F1 为与地层、构造、区域变质等地质背景相关的因子。



因子 F2 的方差贡献率为 17.845%, Au、Hg、Sb、W 有较高的正载荷。Au 的高值中心分布于金矿产地或金矿化点附近, W 的高值中心分布于西安钨金矿附近, Hg、Sb 高值区分布于冷家溪金矿附近。说明 F2 为与金矿、钨金矿等矿脉有关的因子。

因子 F3 的方差贡献率为 14.144%, Ag、Mo 有较高的正载荷。Ag、Mo 除了在震旦纪—寒武纪的黑色岩系中含量较高, 在农业生产区含量值也较高, 可能与上世纪七十年代开展的磷矿粉肥效试验有关, 因此 F3 为与农业生产活动相关的因子。

以上分析结果表明, 研究区 Au、Hg、Sb、W 的成矿潜力最大。

## 5. 异常识别与找矿靶区确定

### 5.1. 异常下限的确定

传统的地球化学异常下限的确定主要是使用统计学方法, 以样品数据呈正态分布为假设前提, 通过计算数据的统计学参数对异常下限进行确定, 一般是以平均值与 K 倍的标准离差之和作为地球化学异常下限值。成秋明[25] [26] [27]等认识到这种方法存在局限性, 从分形的观点(地球化学背景和异常的形成是两个独立的过程)认为地球化学背景值和异常值具有各自独立的幂律关系, 由此导致了一种多重分形分布。该方法较传统方法具有一定优势, 异常较强时, 多重分形方法所确定的异常下限较传统方法确定的异常下限偏高, 可以弱化高背景异常, 缩小异常查证范围; 异常较弱时, 多重分形方法所确定的异常下限较传统方法确定的异常下限偏低, 可以强化低背景异常, 不会遗漏弱异常。

本次研究采用含量—面积模型处理 Au、Hg、Sb、W 数据, 处理过程如下: 首先将原始数据网格化, 绘制元素含量等值线图。然后以  $r$  为等值线含量值,  $N(r)$  为  $r$  等值线所围成的平面面积, 这样就得到  $N(r_1)$ ,  $N(r_2)$ ,  $\dots$ ,  $N(r_m)$  和  $(r_1, r_2, \dots, r_m)$  的数据对, 将这些数据代入分形模型公式中, 应用最小二乘法分段拟合合成多段直线。最后选择各个区间的拟合直线和原数据间的残差平方和最小的值作为分界值。最终拟合结果见表 3。

**Table 3.** Fitting results of content-area model  
**表 3.** 含量 - 面积模型拟合结果

元素	拟合方程	异常下限计算值	异常下限实际取值
Au	方程 1: $\lg N(r)1 = -3.53009 \lg r + 21.09371$ $r < 44.03$	44.03	40
	方程 2: $\lg N(r)2 = -2.25807 \lg r + 16.49105$ $r \geq 44.03$		
Hg	方程 1: $\lg N(r)1 = -3.39528 \lg r + 4.83265$ $r < 0.61$	0.61	1
	方程 2: $\lg N(r)2 = -1.52234 \lg r + 5.45111$ $r \geq 0.61$		
Sb	方程 1: $\lg N(r)1 = -5.24926 \lg r + 16.70724$ $r < 8.53$	8.53	10
	方程 2: $\lg N(r)2 = -1.66259 \lg r + 8.74373$ $r \geq 8.53$		
W	方程 1: $\lg N(r)1 = -3.62537 \lg r + 18.9033$ $r < 22.93$	22.93	20
	方程 2: $\lg N(r)2 = -2.02713 \lg r + 13.97854$ $r \geq 22.93$		

应用上述方法, 将分界点值进行反对数换算, 还原为真数, 即为分形方法确定的异常下限值。研究区 Au、Hg、Sb、W 的异常下限计算值分别为 44.03 ng/g、0.61  $\mu\text{g/g}$ 、8.53  $\mu\text{g/g}$ 、22.93  $\mu\text{g/g}$ 。结合研究区实际情况对计算值取整数作为元素异常下限, Au、Hg、Sb、W 异常下限最终取值分别为 40 ng/g、1  $\mu\text{g/g}$ 、10  $\mu\text{g/g}$ 、20  $\mu\text{g/g}$ 。

## 5.2. 单元素异常特征

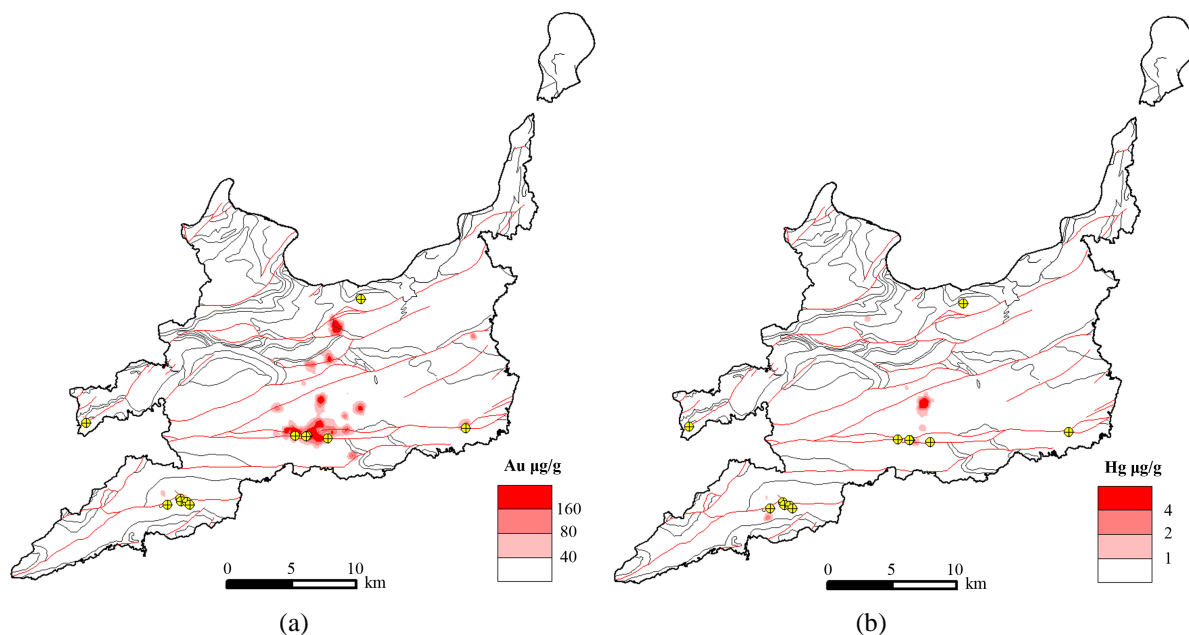
本次研究按元素异常下限的 1、2、4 倍圈定单元素浓度分带, 外带为 1 倍异常下限值, 中带为 2 倍异常下限值, 内带为 4 倍异常下限值。Au、Hg、Sb、W 异常特征分述如下:

研究区 Au 异常强烈, 最高值达 2418.00 ng/g, 是异常下限的 60 倍。Au 总异常面积 46.34 km<sup>2</sup>, 浓度分带明显(图 6(a))。异常区外带含量介于 40~80 ng/g, 面积 23.83 km<sup>2</sup>, 中带含量 80~160 ng/g, 面积 14.21 km<sup>2</sup>, 异常内带含量大于 160 ng/g, 面积 8.30 km<sup>2</sup>。面积最大的 Au 异常区分布在杨溪桥镇中南部煌山村、冷家溪村、竹山村, 近东西向展布, 其他异常分布规律不明显。该异常区地层主体为新元古界冷家溪群小木坪组, 异常展布与断裂密切相关, 两条北东东向断裂贯穿整个异常区, 异常浓集中心正处在两条断裂之间, 异常浓集中心与冷家溪金矿点高度吻合。

研究区 Hg 异常强度中等, 最高值达 21.86 μg/g, 是异常下限的 20 倍。Hg 总异常面积 8.16 km<sup>2</sup>, 浓度分带明显(图 6(b))。异常区外带含量介于 1~2 μg/g, 面积 5.50 km<sup>2</sup>, 中带含量 2~4 μg/g, 面积 1.39 km<sup>2</sup>, 异常内带含量大于 4 μg/g, 面积 1.27 km<sup>2</sup>。Hg 异常集中分布在杨溪桥镇朝阳庵村和落马洞村交界处, Hg 异常形态与 Au 异常形态相近, 但两者浓集中心有一定偏离。

研究区 Sb 异常中等, 最高值达 130.00 μg/g, 是异常下限的 13 倍。Sb 总异常面积 61.00 km<sup>2</sup>, 浓度分带明显(图 6(c))。异常区外带含量介于 10~20 μg/g, 面积 44.69 km<sup>2</sup>, 中带含量 20~40 μg/g, 面积 8.75 km<sup>2</sup>, 异常内带含量大于 40 μg/g, 面积 7.56 km<sup>2</sup>。Sb 异常分布形态和 Hg 高度重合, 浓集中心也十分相近。Hg、Sb 是典型的低温成矿元素, 迁移能力强, 一般位于原生晕的前缘晕, 常作为寻找金矿的远程指示元素, 同时也是金矿的伴生元素。

研究区 W 异常强烈, 最高值达 761.47 μg/g, 是异常下限的 38 倍。W 总异常面积 45.82 km<sup>2</sup>, 浓度分带明显(图 6(d))。异常区外带含量介于 20~40 μg/g, 面积 24.41 km<sup>2</sup>, 中带含量 40~80 μg/g, 面积 14.86 km<sup>2</sup>, 异常内带含量大于 80 μg/g, 面积 6.55 km<sup>2</sup>。面积最大的 W 异常区分布在西安镇的西安村和东安村, 另外在茶庵铺镇的木旺溪村异常面积也较大, 其他异常均较小。W 异常区地层主体为新元古界冷家溪群黄浒洞组, 异常展布与断裂密切相关, 异常浓集中心与西安钨金矿点、木旺溪金矿化点高度重合。



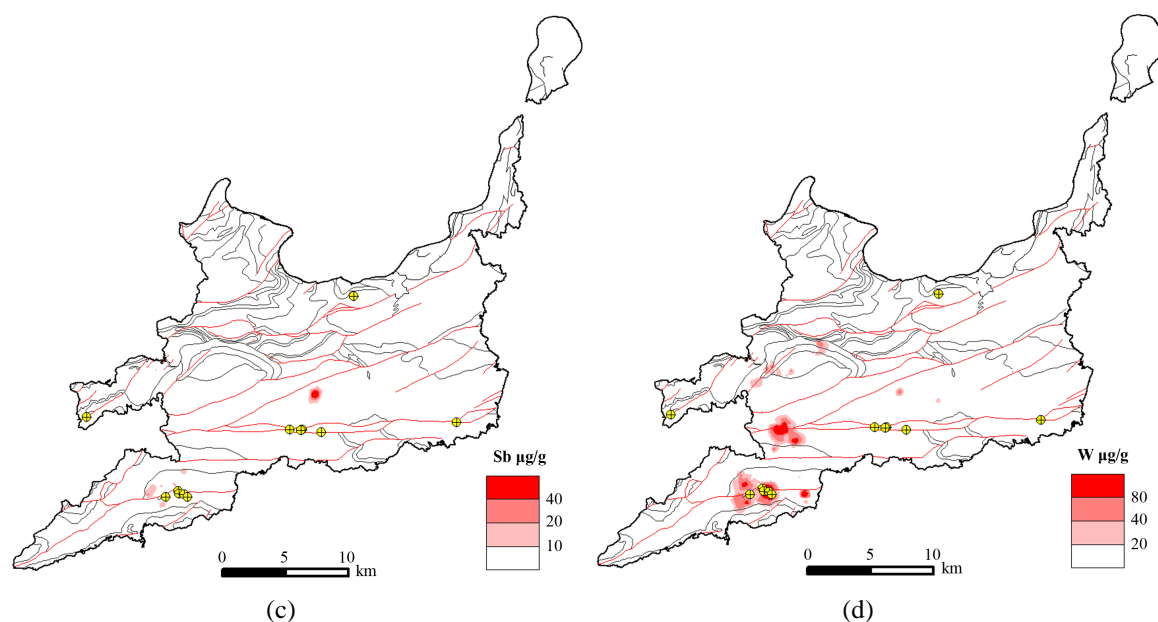


Figure 6. Single element anomaly map of Au, Hg, Sb, and W  
图 6. Au、Hg、Sb、W 单元元素异常图

### 5.3. 典型矿床地质特征及找矿靶区

#### 5.3.1. 西安钨金矿床地质特征

矿体(脉)赋存于新元古界板溪群马底驿组下段白云质灰岩(大理岩)中, 矿脉分布在矿区北部、东南部和西南部, 呈带状展布。矿区有上、下两层矿体。上矿层位于马底驿组下段灰紫色板岩与灰绿色板岩交界处的白云质灰岩中, 含矿层厚 0~11 m; 下矿层位于板溪群马底驿组与下伏冷家溪群不整合面上, 或在不整合面上相距数米到十余米的白云质灰岩中, 含矿层厚 0.5~10 m。

矿石类型为硫化物-石英-方解石网脉带型白钨矿, 细分网脉带型白钨矿、石英脉型白钨矿两种类型, 以网脉带型白钨矿为主。

围岩蚀变与钨矿化关系密切, 围岩蚀变以硅化、褪色化为主, 其次为绿泥石化、黄铁矿化、绢云母化。在硅化强烈的含矿层上其盖层(围岩)褪色化宽度大的部位, 常可找到钨矿体。

结合上述矿床地质特征和图 7 可以看出, 西安型钨金矿矿化富集规律如下: ① 矿床赋存于新元古界板溪群马底驿组底部与下伏冷家溪群不整合面上的白云质灰岩及马底驿组下段的白云质灰岩中。地层岩性控矿十分明显。② 矿床严格受东西向构造带中东安溪逆冲断裂带控制, 为该矿床的导矿构造。次级的东西向、北东向断裂破碎带为矿体的容矿构造。③ 以 W 异常为主, 异常面积大, 强度高, Au 异常面积小, 异常强度中等。Hg、Sb 异常背景值稍高, 但异常微弱。④ 矿体矿石类型较单一, 以网脉带型白钨矿为主, 其次为石英脉型白钨矿。⑤ 硅化强烈和褪色化宽度大的部位, 往往指示有富矿体存在。硅化和褪色化蚀变可以作为寻找钨矿的找矿标志。

#### 5.3.2. 冷家溪金矿床地质特征

矿体(脉)主要赋存于新元古界板溪群马底驿组中上部紫红色板岩、砂质板岩中, 在板溪群五强溪组中亦有产出。该矿区共发现大小含金石英脉 75 条, 矿脉群(带)东西长 4 km, 宽 1.0 km 左右。矿体(脉)长 10~800 m, 矿脉间距数米到 60 m 不等, 呈斜列雁行状。

矿石类型: 主要有石英-白钨矿-黄铁矿型、自然金-黄铁矿-石英型和石英-碳酸盐型三种类型,

其中自然金 - 黄铁矿 - 石英型为最主要的矿石类型。

根据矿物组构和矿体空间分布特征, 该矿区成矿大体可分三个阶段: 第一阶段石英白钨矿期, 围岩蚀变主要有褪色化、硅化、黄铁矿化等; 第二阶段为自然金硫化物期, 蚀变以黄铁矿化为主; 第三阶段为石英碳酸盐期, 蚀变以碳酸盐化为主, 与金矿化关系不甚明显。

结合上述矿床地质特征和图 7 可以看出, 冷家溪型金矿成矿富集规律如下: ① 矿体主要赋存于板溪群马底驿组中上部紫红色绢云母板岩、砂质板岩中, 少数矿体产于板溪群五强溪组凝灰质板岩、凝灰岩中, 受地层岩性控制明显。② 矿床受东西向冷家溪深大断裂带控制, 为控矿构造, 次级东西向断裂破碎带、节理密集带为储矿构造。③ Hg、Sb 异常组合形态相似、位置相近, 异常面积小, 异常强度中等, 是前缘晕的指示元素。W 的背景值较高, 但异常微弱。④ 矿体矿石以自然金 - 黄铁矿 - 石英型为主。⑤ 矿化作用与围岩褪色化、硅化、黄铁矿化关系密切, 各种蚀变作用叠加时形成矿体。

### 5.3.3. 找矿靶区

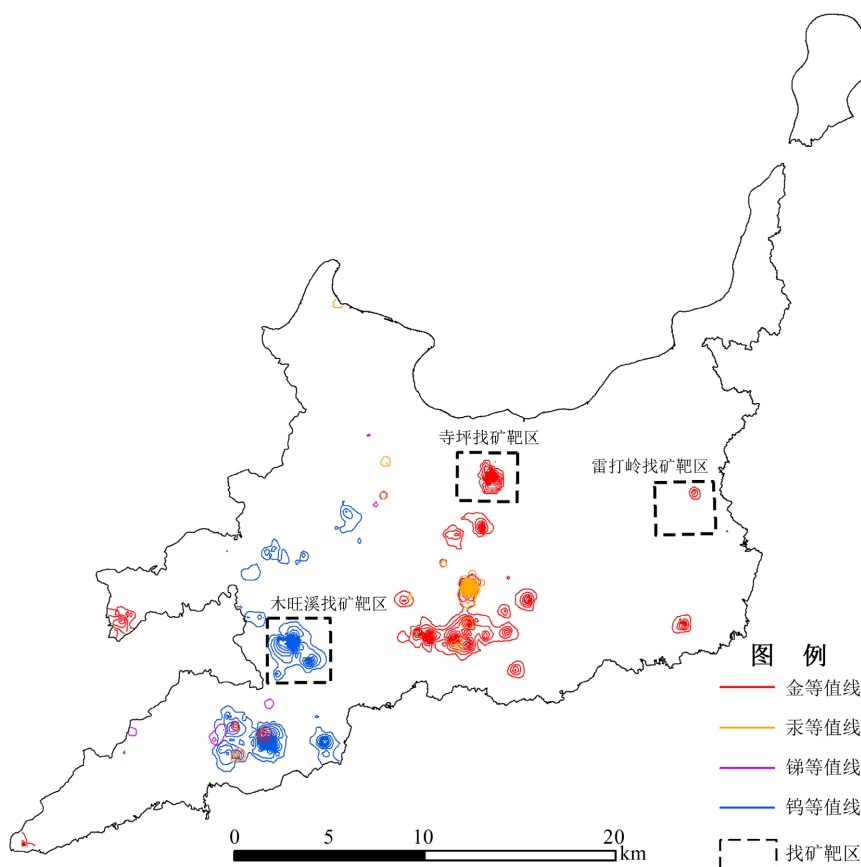


Figure 7. Comprehensive anomalies of Au, Sb, Hg, and W and prospecting targets

图 7. 研究区 Au、Sb、Hg、W 综合异常及找矿靶区

西安钨金矿区、冷家溪金矿区均已有探矿权, 不再作为找矿靶区。综合上述异常特征, 结合地层、岩性、构造等有利控矿因素评判, 在其他研究区共圈出三个 Au-Hg-Sb-W 找矿靶区。

#### ① 寺坪 Au 找矿靶区

该找矿靶区综合异常为以 Au 为主的综合异常, 位于研究区北部, 1:20 万化探异常显示有较好的金元素异常, 在寺坪附近浓集中心明显, 与已知矿点吻合度好。在江里溪、寺坪、齐家冲等地见有多条金

矿化带, 金矿体主要产于板溪群马底驿组和五强溪组断裂破碎带中, 另在冷家溪小木坪组中也见有金矿化带, 岩性主要为板岩、粉砂质板岩、砂质板岩, 呈脉状及透镜状产出。

### ② 雷打岭 Au 找矿靶区

该找矿靶区综合异常为以 Au 为主的综合异常, 位于研究区东部, 1:20 万砂金重砂异常与水系沉积物异常重叠性好, 异常强度高, 浓集中心明显, 与已知矿点吻合度好。在雷打岭等地见有多条金矿化带, 金矿体产于板溪群马底驿组和五强溪组板岩、粉砂质板岩、砂质板岩的层间裂隙及断裂破碎带中, 多呈脉状产出。

### ③ 木旺溪 W-Au 找矿靶区

该找矿靶区综合异常为以 W 为主的综合异常, 位于茶庵铺镇, W 异常规模大、强度高。在木旺溪等地见有多条白钨矿化带, 产于冷家溪群中, 岩性主要为板岩、粉砂质板岩、砂质板岩。

## 5.4. 异常实证

罗大富[28][29]、王操[30]等在雷打岭金矿普查项目中调查发现, 金矿体产于近东西向及北东向蚀变矿化带中, 矿体主要由含金石英脉、含金构造角砾岩及含金蚀变破碎粉砂质板岩与粉砂岩组成, 矿体的产出严格受断裂构造控制。矿石品位最大值 2.91 g/t, 最小值 0.96 g/t, 平均值 1.81 g/t。矿石主要具碎裂结构、镶嵌结构; 角砾状、块状、网脉状及蜂窝状构造。围岩蚀变主要见硅化、黄铁矿化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化等, 地表矿脉带中具较强的褐铁矿化, 其中硅化、黄铁矿化与金矿化关系最为密切。蚀变强度由金矿体向外整体逐渐变弱, 蚀变分带性不明显。调查结果认为雷打岭异常区勘探深度低, 矿体具有半隐伏特征, 初步预测矿区及周边深部找矿潜力巨大。

## 6. 结论

- 1) 研究区土壤地球化学数据聚类分析、因子分析以及元素成矿潜力研究结果表明, Au、Hg、Sb、W 的成矿潜力最大;
- 2) 应用含量—面积分析法计算 Au、Hg、Sb、W 的异常下限值分别为 40 ng/g、1 μg/g、10 μg/g、20 μg/g;
- 3) 单元素异常和组合异常图分析显示, 研究区金矿有两种类型, 一种是冷家溪型金矿, 主要特征是以 Au 异常为主, Hg、Sb 异常吻合度高, 为前缘晕指示元素, W 异常低, 矿产类型以金矿为主。另一种是西安型金矿, 主要特征是以 W 异常为主, Au 异常中等, Hg、Sb 异常低, 矿产类型以钨矿为主, 金矿为辅;
- 4) 通过分析西安钨金矿区、冷家溪金矿区矿床地质特征, 总结成矿富集规律, 圈定了 3 个找矿靶区, 普查结果发现雷打岭附近致矿异常较好, 找矿潜力巨大。

## 致 谢

本文在编写过程中得到了吉林大学地球探测科学与技术学院郝立波教授、赵新运博士和湖南省自然资源事务中心贺安生教授的指导与帮助, 在此表示衷心的感谢!

## 基金项目

湖南省自然资源厅项目“湖南省桃源县地球化学与土地质量调查(20200805)”资助。

## 参考文献

- [1] 柏道远, 李彬, 周超, 孙骥, 魏方辉, 曾广乾, 姜文, 李银敏, 蒋启生. 江南造山带湖南段金矿成矿事件及其构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(5): 897-922.

- [2] 申萍, 沈远超, 王京彬, 刘铁兵, 刘正桃, 付水兴, 李丰收. 湘西桃源县西安钨金矿床褶皱构造的发现及控矿意义[J]. 矿床地质, 2008, 27(3): 357-366.
- [3] 尤泽峰, 李丰收, 杨兵, 甘先平. 湖南省桃源县李家冲金矿主要控矿因素及找矿方向[J]. 矿产与地质, 2006, 20(4): 374-378.
- [4] 王陆飞, 杜潮. 湖南省桃源县冷家溪金矿矿床地质特征及成因分析[J]. 世界有色金属, 2019(3): 102-103.
- [5] 谢逢军. 雪峰弧形构造带中段金矿成矿规律和找矿方向探讨——以冷家溪矿区为例[J]. 世界有色金属, 2020(13): 70-71.
- [6] 向宁, 陈迎培, 吴俊, 唐祺. 桃源县小桃源矿区金矿地质特征及成矿地质条件探讨[J]. 世界有色金属, 2019(13): 52-53.
- [7] 漆炜博, 钱建平, 王子为. 湖南桃源县马家坡金矿控矿条件及找矿标志[J]. 云南地质, 2019, 38(3): 337-342.
- [8] 鲍振襄, 万容江, 鲍珏敏. 湘西钨铋金矿床成矿系列及其稳定同位素研究[J]. 北京地质, 1999(1): 11-17.
- [9] 彭建堂, 胡瑞忠, 赵军红, 符亚洲, 林源贤. 湘西沃溪 Au-Sb-W 矿床中白钨矿 Sm-Nd 和石英 Ar-Ar 定年[J]. 科学通报, 2003, 48(18): 1976-1981. <https://doi.org/10.1360/csb2003-48-18-1976>
- [10] 毛景文, 李红艳. 江南古陆某些金矿床成因讨论[J]. 地球化学杂志, 1997(5): 71-81.
- [11] 顾雪祥, 刘建明, 郑明华, 等. 湖南沃溪钨-铋-金建造矿床海底喷流热水沉积成因的组构学和地球化学证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(4): 235-238.
- [12] 彭渤, Robert, F., 涂湘林. 湘西沃溪 WSbAu 矿床白钨矿 NdSrPb 同位素对成矿流体的示踪[J]. 地质学报, 2006, 80(4): 561-570.
- [13] 李彬, 许德如, 柏道远, 池国祥, 代俊峰, 高成, 邓腾, 邹少浩, 马文, 王国建, 凌跃新, 曾广乾, 李银敏. 湘西沃溪金-铋-钨矿床构造变形、成矿时代及成因机制[J]. 中国科学(地球科学), 2022, 52(12): 2479-2505. <https://doi.org/10.1360/SSTe-2021-0333>
- [14] 丘元禧, 等, 编著. 雪峰山的构造性质与演化: 一个陆内造山带的形成演化模式[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [15] 汪劲草, 夏斌, 雷鸣波, 谭碧富. 伸展型脆-韧性剪切带对沃溪钨铋金矿床的构造控制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(2): 135-140.
- [16] 刘珊, 陈亮, 段先哲, 胡杨, 王正庆, 韩世礼, 马强. 土壤地球化学测量在黔东八瓢达冲金矿勘查中的应用与找矿效果[J]. 物探与化探, 2016, 40(1): 27-32.
- [17] 熊亮, 朱杰勇, 朱林生, 李侃, 洪建磊, 贺瑾瑞, 周健. 土壤地球化学测量在扬子地台西缘会泽铅锌矿带筇竹寺组中的应用[J]. 物探与化探, 2010, 34(4): 467-471, 475.
- [18] 张善明, 冯罡, 张建, 张恩在, 刘雅峰, 刘洪卫. 运用土壤地球化学寻找深部矿体的原理及方法[J]. 地质与勘探, 2011, 47(6): 1114-1123.
- [19] 刘珏玉, 孙成才. 区域化探中评价元素离散程度及找矿意义的方法讨论[J]. 物探化探计算技术, 1990(4): 285-294.
- [20] 袁和, 罗先熔, 李武毅, 陈武. 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.
- [21] 罗先熔, 等, 编著. 勘查地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [22] 李超, 罗先熔, 汤国栋, 邱炜, 商振城, 张文博, 唐瑞, 孙港归. 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.
- [23] 左仁广, 王健, 熊义辉, 王子焯. 勘查地球化学数据挖掘与异常识别[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [24] 姜海伦, 罗先熔, 高文, 郑超杰, 黄文斌, 刘文, 马忠贤, 陶志华. 青海省都兰县开荒地区地球化学特征及找矿预测[J]. 金属矿山, 2020(7): 138-145.
- [25] Cheng, Q.M., Agterberg, F.P. and Ballantyne, S.B. (1994) The Separation of Geochemical Anomalies from Background by Fractal Methods. *Journal of Geochemical Exploration*, **51**, 109-130. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90013-2)
- [26] Cheng, Q.M. (1995) The Perimeter-Area Fractal Model and Its Application to Geology. *Mathematical Geology*, **27**, 69-82. <https://doi.org/10.1007/BF02083568>
- [27] 成秋明. 多维分形理论和地球化学元素分布规律[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2000, 25(3): 311-319.
- [28] 罗大富. 浅谈雷打岭金矿找矿远景[J]. 世界有色金属, 2019(1): 63-64.
- [29] 罗大富, 魏翔. 雷打岭金矿床地质特征、控矿因素、矿床成因及找矿方向[J]. 中国金属通报, 2021(18): 47-49.
- [30] 王操, 罗长江. 浅谈湖南省雷打岭金矿区成矿规律及找矿方向[J]. 世界有色金属, 2023(11): 178-180.