

基于地理加权回归模型的豫西熊耳山地区 金矿地球化学异常提取研究

刘文毅^{1,2}, 梁楠鑫^{2,3}, 杜虹^{1*}, 刘中杰¹, 辛梓豪^{2,3}, 喻姝研^{2,3}, 张娅¹

(1. 河南省地质研究院; 2. 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室;

3. 中南大学地球科学与信息物理学院)

摘要: 熊耳山地区是中国重要的金矿集区,其复杂的构造作用导致与金成矿相关的地球化学异常在空间上呈现非均匀、非线性分布特点,这些特点在传统地球化学预测模型中无法体现。而地理加权回归模型能充分表达地质体分布的各向异性,实现非线性关联的定量化表达。因此,基于水系沉积物地球化学数据,采用地理加权回归模型对熊耳山地区与金成矿相关的地球化学异常进行定量提取。结果显示,与金成矿相关的地球化学异常的高值异常区主要集中在中东部的青岗坪、李岗寨、红椿沟等地区,多沿控矿断裂分布,呈带状展布特征,与区域成矿规律一致。地理加权回归模型的AUC值高达0.918,具备较高的准确度。基于异常提取结果,在熊耳山地区圈定了8处找矿远景区,可为金矿勘查工作提供重要参考。

关键词: 地球化学异常;异常提取;地理加权回归模型;成矿规律;找矿远景区;金矿集区;熊耳山地区

中图分类号:TD15 P618.51 P611

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)06-0062-07

doi:10.11792/hj20250613

引言

熊耳山地区位于河南省洛宁县,是中国重要的金矿集区,已发现的金矿床(点)达100余处,探明金储量超过800 t^[1-4]。熊耳山地区金的成矿过程涉及拆离断裂活动、核杂岩隆升、热液流体渗流-交代等多种构造-岩浆作用耦合^[5],而且经历了成矿后的多频次构造活动和热液改造叠加、剥蚀^[6]。该地区复杂的成矿作用过程导致了与金成矿相关的地球化学异常在空间上呈现非均匀、非线性分布特点^[7],这些特点在传统地球化学异常识别模型中难以有效体现。因此,准确提取与金成矿相关的地球化学异常,为金矿找矿勘查提供可靠指导,对于区域勘查找矿具有重要作用。

地球化学异常是热液型金矿的重要勘查标志之一^[8-10]。而熊耳山地区构造控矿规律复杂,矿床(点)分布的空间异质性明显,具有明显的空间非平稳性。通常,传统异常分析方法基于全局模型,其回归系数通常被设置为定值^[11],通过计算分析元素含量平均值和方差等统计学指标并设定阈值,进而区分异常和背景^[12]。对于成矿作用复杂、具有空间非平稳性地区的

地球化学异常特征,传统方法使用定参数的全局模型将面临严重失真的问题^[13]。然而,地理加权回归模型考虑回归系数随着空间位置的变异性,通过对不同部位赋予局部权重,构建随位置变化的回归模型^[14],精准刻画元素含量与不同控矿因素的空间动态关系,进而有效捕捉空间异质性^[15]。因此,地理加权回归模型有望从复杂的地球化学数据中识别与金成矿相关的地球化学异常,发现非均匀、非线性的矿致地球化学异常。

本文基于熊耳山地区1:20万水系沉积物地球化学数据,采用地理加权回归模型对熊耳山地区与金成矿相关的地球化学异常进行定量提取,构建矿致异常的空间分布模型,开展异常精度评价工作,总结与金成矿相关的地球化学异常分布特点与展布规律,并圈定找矿远景区,为后续找矿工作提供依据。

1 地质概况

熊耳山地区大地构造位置为华北板块南缘与秦岭造山带相接处,是华北板块与华南板块的拼接部位^[3]。区域地质构造具有典型克拉通边缘特征^[16]。熊耳山地区出露地层主要有太古宇太华群深变质结

收稿日期:2024-12-10; 修回日期:2025-03-26

基金项目:河南省地质研究院2024年度地质科技攻关项目(2024-903-XM05);国家重点研发计划项目(2023YFC2906404)

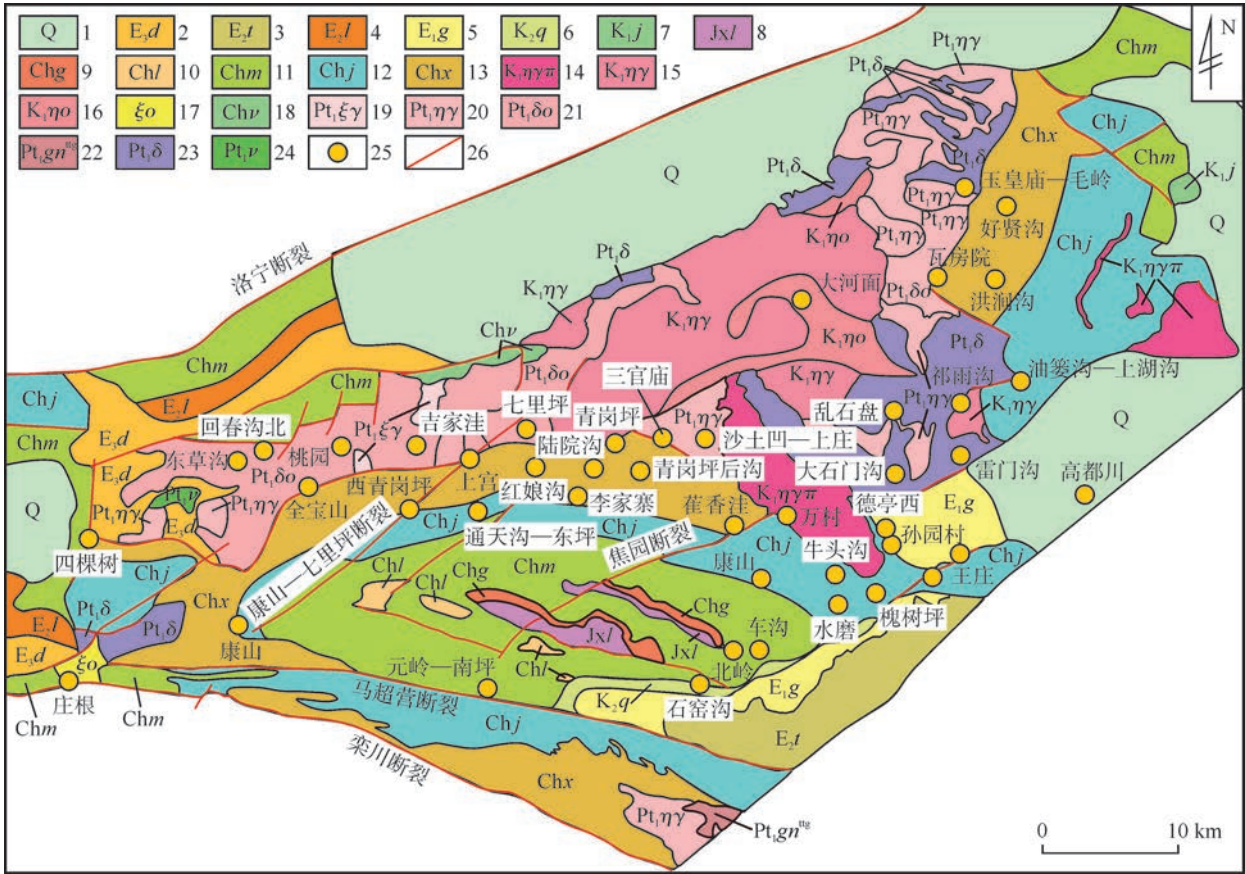
作者简介:刘文毅(1984—),男,高级工程师,博士,从事地学大数据研究工作;E-mail:254913864@qq.com

*通信作者:杜虹(1989—),女,工程师,研究方向为地质信息化;E-mail:297306003@qq.com

晶基底,中元古界熊耳群火山岩、官道口群海相碳酸盐岩作为盖层,最上部为中—新生代盆地相碎屑沉积岩^[17]。

熊耳山地区出露断裂主要有马超营断裂、洛宁断裂和栾川断裂等3条断裂(见图1)。马超营断裂位于华北板块南缘的北部,熊耳山地区南部,是燕山期形

成的熊耳山南坡最大北西向区域性断裂;洛宁断裂形成于燕山晚期—喜马拉雅早期,是华北板块南部和华北板块北部的分界断裂,地理跨度较大,西起河南省三门峡,东边延伸可达鲁山地区;栾川断裂位于东秦岭北部,是秦岭造山带与华北板块的分界线,该断裂西起陕西省宝鸡市,向东延伸至栾川县^[18-21]。



1—第四系 2—大峪组 3—潭头组 4—卢氏组 5—高峪沟组 6—秋扒组 7—九店组 8—官道口群龙家园组 9—高山河组 10—熊耳群龙脖组
11—熊耳群马家河组 12—熊耳群鸡蛋坪组 13—熊耳群许山组 14—早白垩世二长花岗岩 15—早白垩世二长花岗岩
16—早白垩世石英二长岩 17—石英正长岩 18—长城纪辉长岩 19—古元古代正长花岗岩 20—古元古代二长花岗岩
21—古元古代石英闪长岩 22—古元古代片麻岩 23—古元古代闪长岩 24—古元古代辉长岩 25—金矿床(点) 26—断裂

图1 熊耳山地区地质简图

Fig. 1 Geological sketch of the Xiongershan Area

熊耳山地区的主要变质-岩浆活动分为3期:晚太古代,构成结晶基底的太华群中基性火山岩及侵入的花岗岩经区域变质作用形成各类片麻岩和角闪岩类;中元古代,岩浆活动主要形成了裂谷型中基性—中酸性火山岩;中生代岩浆活动频繁,主要有辉长岩、碱性正长岩,呈脉状、墙状产出,整体走向为北西西向^[22-24]。

熊耳山地区发育大量金矿、有色金属矿及非金属矿。金矿主要集中分布在马超营断裂两侧,受断裂控制。金矿床类型主要为蚀变型和隐爆角砾岩型,如青岗坪金矿床、潭头金矿床、上官金矿床、祁雨沟金矿床等^[25-32]。

2 数据与方法

2.1 数据来源与分析方法

本研究的基础数据由2部分构成:1:20万水系沉积物地球化学数据和熊耳山地区矿点空间信息数据。其中,水系沉积物样品按1件/km²的密度开展采样工作,多数样品采集质量达120 g以上,将4件相邻采样区样品合并为1件复合样品以提高分析效率。主量元素采用X射线荧光光谱法(XRF)测定,微量元素采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定。根据分析结果获得的熊耳山地区代表性元素地球化学等值线图见图2。

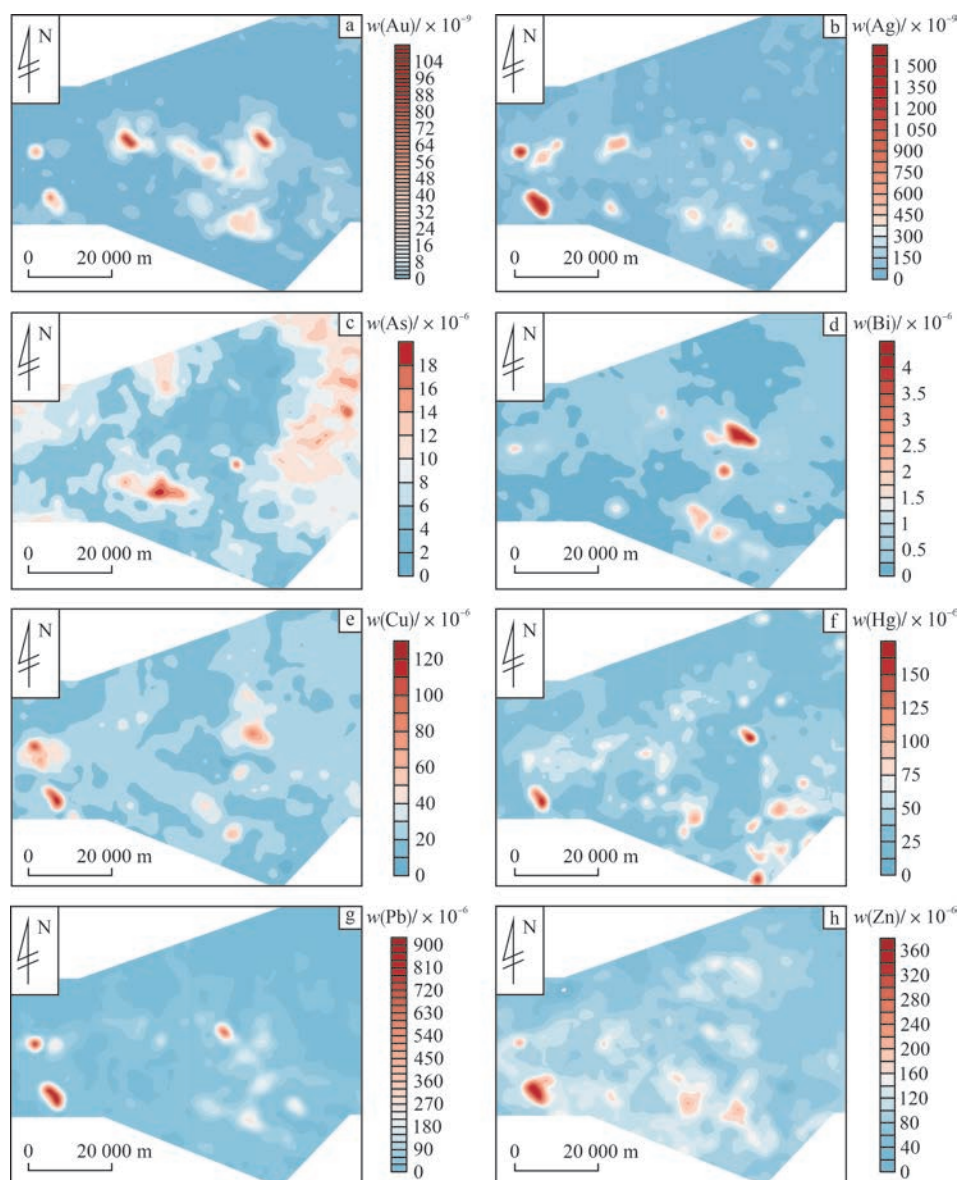


图2 熊耳山地区代表性元素地球化学等值线图

Fig. 2 Geochemical contour map of representative elements in the Xiongershan Area

在数据预处理环节,本文采用逆地理编码技术将经纬度坐标转换为地理平面投影坐标,以地质图件上的金矿床(点)位置为依据解释异常空间分布。

2.2 地理加权回归

地理加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)是一种广泛应用于地理学和空间格局分析的空间分析方法。通过在每个采样点建立局部回归方程,GWR可以在一定尺度上探索目标的空间变化及相关驱动因素,并用于预测未来结果。

1) GWR模型。

对于每个采样点,GWR模型为:

$$Y(u) = \beta_0(u) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u) \cdot X_k(u) + \varepsilon(u) \quad (1)$$

式中: $Y(u)$ 为位置 u 处因变量的值; $\beta_0(u)$ 为截距; p 为回归项的个数; $\beta_k(u)$ 为第 k 个自变量的回归系数;

$X_k(u)$ 为位置 u 处第 k 个自变量的值; $\varepsilon(u)$ 为随机误差。

GWR模型与普通线性回归模型最明显的区别是:GWR模型估计的是每个点的回归系数,而普通线性回归模型是基于整个研究区域的回归系数。

GWR模型通常用以下矩阵形式表示:

$$Y(u) = X(u) \cdot \beta(u) + \varepsilon(u) \quad (2)$$

式中: $X(u)$ 为 u 点处的行向量。

u 点回归系数的估计值为:

$$\hat{\beta}(u) = [X^T W(u) X]^{-1} X^T W(u) Y \quad (3)$$

式中: $\hat{\beta}(u) = (\hat{\beta}_0(u), \hat{\beta}_1(u), \dots, \hat{\beta}_p(u))$,为 u 点处的回归系数向量; $X = [X_1^T, X_2^T, \dots, X_n^T]^T$ 为自变量的设计矩阵; $W(u)$ 为 u 点处 $n \times n$ 的对角权重矩阵,其中包含一列全为1的截距项; Y 为因变量的 $n \times 1$ 向量, n 为在局部回

归中使用的观测数据点的个数。

由式(2)可知,GWR模型可以看作是一个局部加权最小二乘回归模型。为了计算 u 点处的回归系数,必须先计算周围样本相对于待估计位置的权重矩阵。

2)空间权重函数。

GWR模型的核心是空间权重矩阵,通过选择不同的空间权重函数来表达对数据空间关系的不同理解。空间权重函数对于GWR模型参数的正确估计非常重要。GWR模型有2种权重函数:一种是在整个研究区内固定的函数,另一种是可以根据数据密度进行调整的自适应权重函数。在GWR模型实际应用中,首选随距离单调减小的自适应权重函数,如高斯权重函数(W_{ij} ,见式(4)):

$$W_{ij} = \exp\left[-(d_{ij}/r)^2\right] \quad (4)$$

式中: d_{ij} 为观测点 i 相对于待估计点 j 的距离; r 为带宽参数,用来控制观测点空间相关性的范围和衰减模式。

在式(4)中,观测点 i 相对于待估计点 j 的权值是距离 d_{ij} 和带宽参数 r 的函数。

3)空间权重函数的带宽参数选择。

GWR模型中的带宽参数 r 对预测结果有较大影响。估计权重函数的带宽参数有3种方法:直接分配最近邻带宽法、交叉验证法和校正的赤池信息准则。在估计最优带宽参数时,可以确定权重函数。从估计的权重函数中可以得到各模型的权重矩阵,然后得到估计的局部回归系数。

本文在PyTorch框架下实现了GWR模型的构建,并利用自动超参数优化框架智能神经网络(NNI)工具进行参数自动调整,最终确定最优的异常提取模型。

2.3 异常提取

每个采样点处各元素含量的重构值(即预测值)由GWR模型计算得到,该方法考虑了地质背景、地形等与自然空间变化相关的多种影响因素,其结果可作为地球化学背景值。欧氏距离用于衡量样本特征差异,距离越大,样本越异常,故目标样本原始与重构元素含量的欧氏距离即为异常分数。设目标样本的第 k 个元素原始含量值为 x_{ik} ,重构后为 $\hat{x}_{ik}$,则异常分数 S_i 为:

$$S_i = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - \hat{x}_{ik})^2} \quad (5)$$

式中: m 为元素的总数。

通过计算各样本异常分数,可量化其偏离正常地球化学模式程度,以此确定潜在地球化学异常区,为后续深入研究提供依据并推动该领域研究进展。

3 结果与分析

3.1 基于ILR的因子分析处理

地球化学数据具有闭合效应。本研究采用等距对数比(ILR)转换算法与因子分析法相结合的方式,确立了累计方差 $\geq 70\%$ 且特征值 >1 的双重筛选标准,最终得到8个主因子。其中,第二主因子作为Au元素的主要荷载因子,对成矿规律研究具有关键指示作用。

对比试验研究采用ILR转换算法进行数据预处理的因子分析结果显示,第二主因子荷载元素组合为Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Hg、B、Ba、Mo;而常规对数转换处理结果则呈现Au、Ag、Cu、Pb、Zn、P、Hg、Bi、Mo的差异组合。2套方案元素组合的差异验证了ILR转换算法在处理元素相关性方面的技术先进性,也揭示了传统方法可能导致元素关联性误判问题。

3.2 地球化学异常提取结果

多元地球化学异常的识别结果与已知金矿床(点)之间的空间关联性^[33],是评估地球化学异常识别模型有效性的关键统计指标,能够有效反映模型在实际应用中的识别性能。通过绘制ROC(受试者工作特征)曲线并计算AUC(曲线下面积)值,可以直观展示模型在异常识别中的预测能力及其准确性,进而为模型的评估提供量化依据。

本文采用GWR模型,并充分考虑区域空间特征^[34],从而有效识别各采样点的地球化学异常。试验结果表明,所构建的GWR模型AUC值达到了0.918(见图3),表明该方法在地球化学异常识别中具有较高的准确性和可靠性。

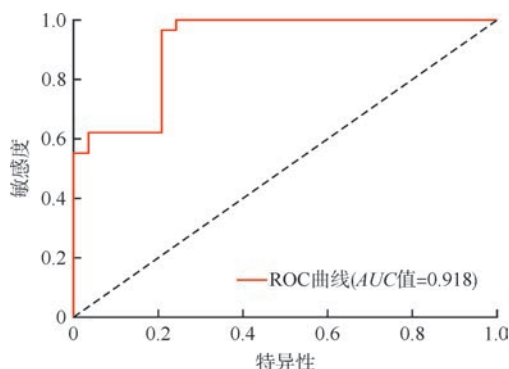


图3 基于GWR模型的ROC曲线

Fig. 3 ROC curve based on the GWR model

熊耳山地区基于GWR模型的地球化学异常图见图4。由图4可知:基于GWR模型的提取结果,熊耳山地区的地球化学异常分布特征呈现出明显的空间差异性。高值异常区主要集中在中东部,如青岗坪、李岗寨、红椿沟等地区。这些异常区的分布与区

域内的断裂分布范围高度重合,主要呈带状和斑块状分布。尤其在马超营断裂周边及其延伸地带,地球化学异常分布具有明显的线性展布特征,表明区域断裂

作为重要的与成矿相关的岩浆-热液运移通道,在成矿物质的迁移与富集过程中起到了显著的导向和控制作用。

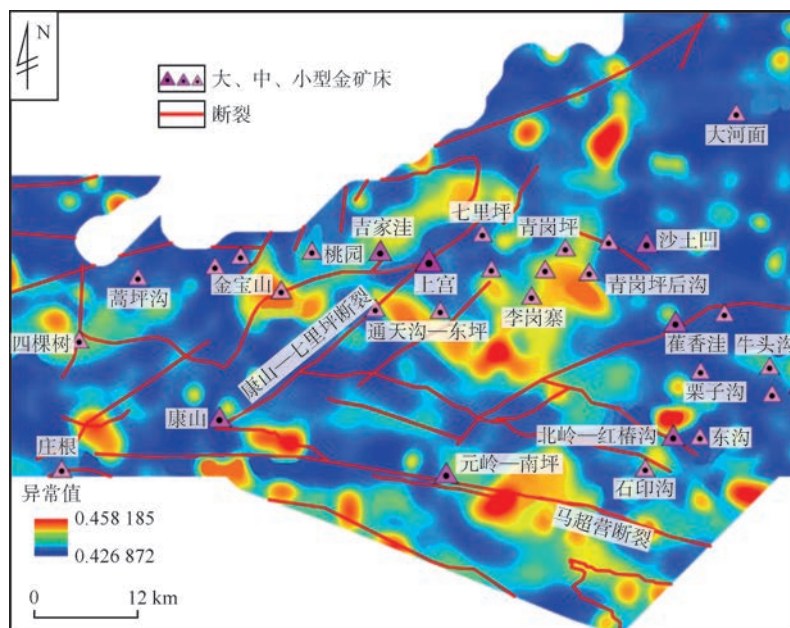


图4 熊耳山地区基于GWR模型的地球化学异常图

Fig. 4 Geochemical anomaly map of the Xiongershan Area based on the GWR Model

进一步分析发现,部分高值异常区与已知金矿床(点)高度对应,如金山、青岗坪后沟等地区,揭示了地球化学异常的高值异常区分布与区域金矿化分布的耦合关系。这表明,沿断裂发育的地球化学异常不仅反映了构造活动的地质控制作用,也与断裂所控制深部来源岩浆-流体的就位成矿密切相关。在区域东西向深大断裂如马超营断裂及其次级断裂附近,地球化学异常往往集中于断裂交会或延伸区域,指示这些区域可能具有较高的成矿潜力。

与传统的全球回归模型相比,GWR模型引入了空间权重,实现了对变量关系的局部建模,能够有效捕捉地球化学数据的空间非平稳性及局部异质性。在异常提取过程中,GWR模型能够根据地理空间特征动态调整回归参数,精准识别异常区,揭示异常值与区域构造、金矿(床)点分布之间的内在联系。这一优势使得地球化学异常的空间分布规律更加符合实际地质特征,为地质勘查中找矿靶区的精准识别提供了有力支撑。

3.3 金矿勘查建议

熊耳山地区金矿具有明显的断裂控矿特征,本文数据表明,矿致地球化学异常主要分布在马超营断裂及其次级断裂附近,异常区的分布相对集中在熊耳山地区中东部,异常值表现为由中心向外逐渐递减的规律,展现出较好的异常空间变化连续性。根据异常

提取结果,在熊耳山地区圈定了8处找矿远景区(见图5)。找矿远景区分别位于庄根金矿床东北部次级断裂交会部位(1)、金山金矿床周边(2)、康山金矿床以东的马超营次级断裂(3)、通天沟—东坪金矿床东南部(4)、元岭—南坪金矿床东南部(5)、大河面金矿床以西(6)、青岗坪后沟金矿床周边(7)、北岭—红椿沟以北(8)。这些找矿远景区尚未有开采中的金矿,但显示金成矿的异常值较高,本文结果指示了可能存在隐伏构造控制的金矿床(点)。青岗坪后沟金矿床周边、大河面金矿床以西、通天沟—东坪金矿床东南部和元岭—南坪金矿床东南部这4个找矿远景区具有近似呈北东向线性排列的特点;而庄根金矿床东北部次级断裂交会部位、康山金矿床以东的马超营次级断裂、元岭—南坪金矿床东南部展现出近东西向线性展布的特点,均与区域控矿构造展布方向一致,表明这些区域具有较好的找矿潜力。

4 结 论

1)采用GWR模型,通过局部加权调整回归系数,建立了不同位置上地球化学异常与金矿床(点)的关联关系。GWR模型AUC值达到了0.918,说明该模型能高效且准确地识别熊耳山地区的地球化学异常。

2)地球化学异常的空间分布与控矿构造密切相关,呈现出明显的条带状展布特征,与已知金矿床

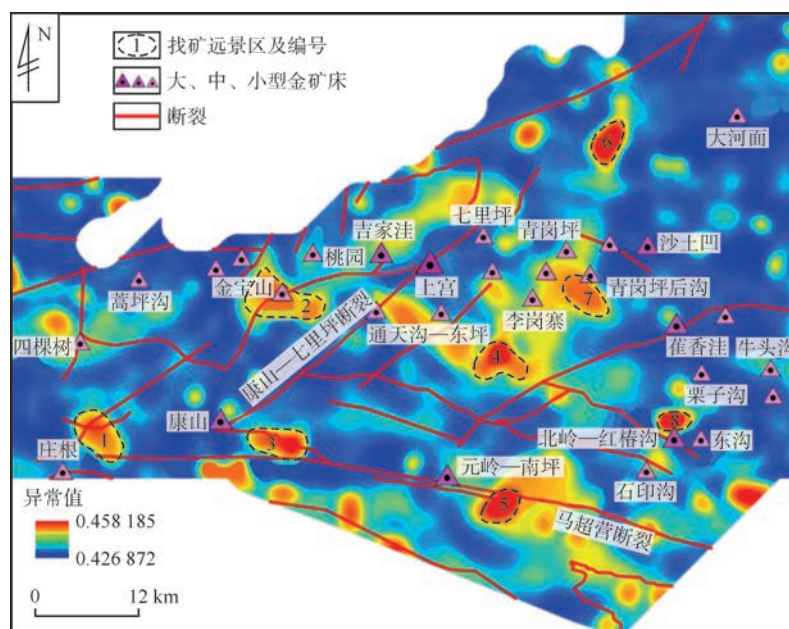


图5 熊耳山地区找矿远景区分布

Fig. 5 Distribution of target areas with prospecting prospects in the Xiongershan Area

(点)构成连续的矿化带。基于异常识别结果,在熊耳山地区圈定了8处找矿远景区。

[参考文献]

- [1] 毛景文,郑榕芬,叶会寿,等.豫西熊耳山地区沙沟银铅锌矿床成矿的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地质意义[J].矿床地质,2006,25(4):359-368.
- [2] DENG J, GONG Q J, WANG C M, et al. Sequence of Late Jurassic-Early Cretaceous magmatic-hydrothermal events in the Xiong'ershan region, Central China: An overview with new zircon U-Pb geochronology data on quartz porphyries[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 79: 161-172.
- [3] 范宏瑞,谢奕汉,赵瑞,等.豫西熊耳山地区岩石和金矿床稳定同位素地球化学研究[J].地质找矿论丛,1994,9(1):54-64.
- [4] GAO F, DU Y, PANG Z, et al. LA-ICP-MS trace-element analysis of pyrite from the Huanxiangwa Gold Deposit, Xiong'ershan District, China: Implications for ore genesis[J]. Minerals, 2019, 9(3): 157.
- [5] 王志光,张录星.熊耳山变质核杂岩构造研究及找矿进展[J].有色金属矿产与勘查,1999(6):388-392.
- [6] 李国平.河南熊耳山矿集区破碎带蚀变岩型金矿床构造控矿规律研究[J].黄金,2013,34(7):22-26.
- [7] 陈永清,赵鹏大.综合致矿地质异常信息提取与集成[J].地球科学(中国地质大学学报),2009,34(2):325-335.
- [8] ZHANG Y, CHEN Y, LI D, et al. Tracing sources of geochemical anomalies in a deeply buried volcanic-related hydrothermal uranium deposit: The Daguanchang Deposit, northern Hebei Province, North China Craton [J]. Journal of Earth Science, 2024, 35 (4) : 1 186-1 195.
- [9] HOU Z, WANG Q, ZHANG H, et al. Lithosphere architecture characterized by crust-mantle decoupling controls the formation of orogenic gold deposits[J]. National Science Review, 2023, 10(3): 77-91.
- [10] 杨斌,王慧,阚靖,等.胶西北河东金矿多元异常信息找矿预测[J].地学前缘,2014,21(5):221-226.
- [11] 杨毅.顾及时空非平稳性的地理加权回归方法研究[D].武汉:武汉大学,2016.
- [12] 胡予兴.选择提取技术在表生地球化学异常评价中的应用研究[J].地球科学,1989,14(4):346-366,378.
- [13] 成秋明.成矿过程奇异性与矿产预测量化的新理论与新方法[J].地学前缘,2007,14(5):42-53.
- [14] OSHAN T, LI Z, KANG W, et al. MGWR: A python implementation of multiscale geographically weighted regression for investigating process spatial heterogeneity and scale [J]. ISPRS International Journal of Geo-information, 2019, 8(6): 269.
- [15] 覃文忠.地理加权回归基本理论与应用研究[D].上海:同济大学,2007.
- [16] LI N, CHEN Y, MCNAUGHTON N, et al. Formation and tectonic evolution of the khondalite series at the southern margin of the North China Craton: Geochronological constraints from a 1.85 Ga Mo deposit in the Xiong'ershan area [J]. Precambrian Research, 2015, 269: 1-17.
- [17] 曾涛,唐利,黄丹峰,等.豫西熊耳山矿集区祁雨沟斑岩型金矿床地质特征及找矿意义[J].黄金,2019,40(10):4-9.
- [18] 毛景文,谢桂青,张作衡,等.中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J].岩石学报,2005,21(1):171-190.
- [19] 梁新辉.熊耳山矿集区干树金矿床深部大型盲矿体的发现及意义[J].黄金,2019,40(1):13-17.
- [20] 吴强.华北克拉通南缘熊耳山地区晚中生代钨、金成矿关系研究[D].广州:中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所),2021.
- [21] WANG B, HU X, TANG L, et al. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf-O isotopes of the Banzhusi granite porphyry from the Xiong'ershan Area, East Qinling Orogen, China: Implications for petrogenesis and geodynamics[J]. Minerals, 2019, 9(9): 538.
- [22] 陈衍景,隋颖慧,FRANCO P. CMF模式的排他性依据和造山型银矿实例:东秦岭铁炉坪银矿同位素地球化学[J].岩石学报,2003,19(3):551-568.
- [23] 王卫星,邓军,龚庆杰,等.豫西熊耳山五丈山、花山、合峪花岗

- 岩体与金成矿关系[J].黄金,2010,31(4):12-17.
- [24] 刘文毅. 崞山-熊耳山地区金多金属矿床大数据分析与勘查靶区优选研究[D].长沙:中南大学,2022.
- [25] 刘清泉,张青山,曾毅,等.熊耳山地区栗子沟金矿勘查区构造叠加晕研究及找矿预测[J].矿产勘查,2024,15(9):1711-1719.
- [26] 熊索菲,姚书振,宫勇军,等.河南祁雨沟金矿临界-超临界包裹体特征及成矿流体演化[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(1):120-133.
- [27] 徐刚,张有,方荣,等.河南省熊耳山地区金矿床类型及控矿因素分析[J].黄金,2013,34(2):25-31.
- [28] 徐宪立,禹明高,张剑锋.熊耳山地区康山金矿田地质特征及成矿模式[J].黄金,2020,41(12):29-34.
- [29] 王俊德,冯绍平,汪洋,等.熊耳山干树金矿床主矿脉深部找矿前景分析[J].黄金,2018,39(5):8-12.
- [31] 马桂霞,朱海.华熊地块熊耳山地区金矿床特征及控矿因素研究[J].黄金,2004,25(10):15-19.
- [32] 李斌,臧兴运,王永胜,等.夹皮沟成矿带小北沟金矿床成矿流体特征及其地质意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(5):1575-1591.
- [33] 王学阳,杨言辰,刘志宏,等.长江中下游成矿带大金山地区综合信息找矿效果及深部找矿潜力分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2025,55(1):125-138.
- [34] 赵忠海,崔晓梦,孙景贵,等.基于三维地质-地球物理建模的深部成矿预测——以黑河地区永新金矿床为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(2):498-515.

Geochemical anomaly extraction for gold deposits in the Xiongershan Area, Western Henan, based on the geographically weighted regression model

Liu Wenyi^{1,2}, Liang Nanxin^{2,3}, Du Hong¹, Liu Zhongjie¹, Xin Zihao^{2,3}, Yu Shuyan^{2,3}, Zhang Ya¹

(1. Henan Academy of Geology;

2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Central South University;

3. School of Geosciences and Info-physics, Central South University)

Abstract: The Xiongershan Area is a significant gold province in China. Due to complex tectonic activities, gold-related geochemical anomalies in the area show spatially heterogeneous and nonlinear distribution patterns, which are difficult to characterize using traditional geochemical prediction models. In contrast, the geographically weighted regression (GWR) model effectively captures the anisotropic distribution of geological bodies and enables the quantitative expression of nonlinear relationships. Based on stream sediment geochemical data, this study applied the GWR model to quantitatively extract gold-related geochemical anomalies in the Xiongershan Area. The results indicate that areas with higher anomalous values among the anomalies are mainly concentrated in the central and eastern areas, such as Qinggangping, Ligangzhai, and Hongchungou, and predominantly distributed along ore-controlling faults in a belt-like pattern, consistent with regional metallogenic rules. The *AUC* value of the GWR model reached 0.918, demonstrating high accuracy. Based on the anomaly extraction results, 8 target areas with prospecting prospects were delineated in the Xiongershan Area, providing valuable references for future gold exploration efforts.

Keywords: geochemical anomaly; anomaly extraction; geographically weighted regression model; metallogenic rule; target area with prospecting prospects; gold province; Xiongershan Area