第 57 卷 第 1 期 2024 年 (总 231 期)

北地 西 质

NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 57 No. 1 2024(Sum231)



引文格式:林俞亨,王立立,欧阳永棚,等.基于浓度-面积分形模型和模糊证据权的铜矿资源潜力评价:以江西九 瑞地区为例[J].西北地质,2024,57(1):165-178. DOI: 10.12401/j.nwg.2023199

Citation: LIN Yuheng, WANG Lili, OUYANG Yongpeng, et al. Evaluation of Copper Mineral Resource Potential Using Concentration–Area Fractal Model and Fuzzy Evidence Weighting: A Case Study of the Jiurui Region in Jiangxi[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 165–178. DOI: 10.12401/j.nwg.2023199

基于浓度-面积分形模型和模糊证据权的铜矿资源 潜力评价:以江西九瑞地区为例

林俞亨1,王立立1,欧阳永棚1,2,3,*,李增华1,曾闰灵2,3,陈祺2,3,邓友国2,3

(1. 东华理工大学地球科学学院,江西南昌 330013; 2. 江西省地质局第十地质大队,江西鹰潭 335001;3. 鹰潭市紧缺及优势矿产勘查与研究重点实验室,江西鹰潭 335001)

摘 要:中国江西省的九瑞地区是长江中下游成矿带中最重要的铜矿产地之一,其中花岗闪长斑 岩与铜成矿关系密切。基于水系沉积物与矿化相关的信息,采用因子分析(FA)、浓度-面积分形 法(C-A)和模糊证据权方法(FWofE)相结合建立成矿潜力预测模型。使用因子分析处理包含 32个元素的255份水系沉积物样本数据,找到能够指示铜矿化的组合元素(即主因子)。采用多 重分形反距离加权插值法(MIDW)创建主因子得分栅格图并用C-A分形模型提取与铜矿化相关 的地化异常。将得到和铜矿化相关的地球化学异常图与地质、遥感解译数据相结合,应用模糊 证据权方法建立预测模型。结果表明:已知铜矿床位于圈定预测概率高值区,且受花岗闪长斑 岩和断裂的分布共同控制;除已知铜矿床区域外,圈定的3个一级远景区域内也具有较高的概率, 值得进一步铜勘查找矿工作的进行。

关键词:矿产资源评价;铜矿;模糊证据权;C-A分形模型;九瑞地区

中图分类号: P618.41 文献标志码: A 文章编号: 1009-6248(2024)01-0165-14

Evaluation of Copper Mineral Resource Potential Using Concentration–Area Fractal Model and Fuzzy Evidence Weighting: A Case Study of the Jiurui Region in Jiangxi

LIN Yuheng¹, WANG Lili¹, OUYANG Yongpeng^{1,2,3,*}, LI Zenghua¹, ZENG Runling^{2,3}, CHEN Qi^{2,3}, DENG Youguo^{2,3}

 School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. 10th Geological Party of Jiangxi Bureau of Geology, Yingtan 335001, Jiangxi, China; 3. Yingtan Key Laboratory of Exploration and Research of Scarce and Advantage Minerals, Yingtan 335001, Jiangxi, China)

Abstract: The Jiurui region in Jiangxi Province, China, is one of the most significant copper mining areas in the middle and lower reaches of the Yangtze River mineralization belt, with a close relationship between gran-

收稿日期: 2023-10-08; 修回日期: 2023-11-18; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 江西省科技厅重点研发计划项目(20212BBG73045), 江西省地质局青年科学技术带头人培养计划项目 (2022JXDZKJRC02), 鹰潭市科技计划项目(20233-185656)联合资助。

作者简介:林俞亨(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事综合信息矿产预测研究。E-mail: 1033425063@qq.com。

^{*}通讯作者: 欧阳永棚 (1988-), 男,博士,高级工程师,主要从事勘查地质学和区域成矿学研究。 E-mail: yongpeng0524@163.com。

odiorite porphyry and copper mineralization. In this study, a predictive model for mineralization potential was established by combining factor analysis (FA), concentration-area (C-A) fractal method, and fuzzy weight of evidence (FWofE) based on information related to stream sediment and mineralization. ϕ factor analysis was applied to a dataset of 255 stream sediment samples containing 32 elements to identify combinations of elements (principal factors) indicative of copper mineralization. κ the principal factor scores were interpolated using the multiple inverse distance weighted (MIDW) method to create a raster map, and the C-A fractal model was employed to extract geochemical anomalies associated with copper mineralization. λ the geochemical anomaly map related to copper mineralization was integrated with geological and remote sensing interpretation data, and a predictive model was established using the fuzzy weight of evidence method. The results indicated that: known copper deposits are located within high-probability zones defined by the model and are influenced by the distribution of granodiorite porphyry and faults; in addition to the known copper deposit areas, three primary prospective areas identified within the defined regions also exhibit a high probability, meriting further exploration ef-

forts for copper prospecting.

Keywords: mineral resources evaluation; copper mine; fuzzy weight of evidence; C–A fractal model; Jiurui region

铜具有优良的导热、导电性能和较强的延展性, 因其优良的特性,被广泛应用于各个领域并在日常基 础设施和技术中发挥着不可替代的作用(Ayres et al., 2003)。世界铜产量在过去70年稳步增长,其中,中 国是对世界铜产量做出重大贡献的国家之一,具有丰 富的铜矿资源(Mudd et al., 2018)。此外,长江中下游 成矿带是中国最具悠久历史的多金属成矿带之一(王 兆强等, 2023), 位于该成矿带西部的江西省九瑞地区 是中国重要的铜产区,该区域有较好的铜找矿潜力(徐耀明, 2014)。另一方面, 如地球化学测绘、证据权 重法等矿床资源定量评价的方法,能够结合地质、地 球物理、地球化学、遥感等数据进行信息综合,进行 预测远景区的圈定,对指导找矿勘查具有重要意义(欧阳渊等, 2023)。因此, 可以利用已有的地球化学数 据和地质数据等其他信息来进行处理,对九瑞地区指 导铜矿产勘查(薛琮一等, 2020; 李文明等, 2021; Li et al., 2022)

地球化学微量元素作为成矿的直接物质来源,一 直是地质工作者研究的重点,如何快速、高效的识别 地球化学异常则是处理地球化学数据的一大难题。 其中,分形/多重分形模型是识别地球化学异常的强有 力的工具(Zuo et al., 2011, 2012, 2013)。自从 Mandelbrot(1982)提出分形理论以来,已经有许多成果利 用分形/多重分析理论从背景中提取出了异常。例如 Cheng 等(1994)提出了浓度-面积(C-A)分形模型,并 成功应用在米切尔-硫酸盐区金-铜异常的提取。各 种分形方法,包括能谱-面积分形模型(S-A)、浓度- 数量分形模型(C-N)、分形奇异值分解法(MSVD)等 都能较好的用于不同矿化系统,并成功区分出地球化 学异常和背景(Cheng, 2004; Ali et al., 2007; Hassanpour et al., 2013)。

源自于没有空间意义的医学诊断上发展而来的 证据权模型(Weight of Evidence, 简称 WofE)被国内外 学者广泛应用于多元信息综合和空间决策支持系统, 它可以整合多源地质信息作为诸多证据因子,从而形 成潜在矿产分布的后验概率图(Agterberg, 1989; Agterberg et al., 1994; Keller, 1995; 张津瑞等, 2023)。 Agterberg 等(1990)首次将证据权方法用于成矿预测 中。在此基础上, Cheng 等(1999)发展出了模糊证据 权重法。模糊证据权重(FWofE)是一种用于支持决策 预测目的的数据集成方法,是一种空间决策支持方法。 相比于普通证据权方法,模糊证据权重法通过引入模 糊集合理论和隶属度函数,可以有效地减少由于遗漏 或错误标记的数据引起的不确定性和提高地质数据 的可信度,在确定模糊隶属度函数以代替后验概率计 算的缺失数据方面更加灵活,为地质分析和决策提供 更可靠的基础,其已被广泛应用于矿产潜力预测中 (Cheng et al., 2002)。成秋明等(2007)采用模糊证据 权等技术对老王寨及其邻区的金矿资源进行潜力评 价,成功圈定有利成矿地段。Xiao 等(2020)综合普通 证据权、模糊证据权和逻辑回归3种方法,利用构造、 岩性、地球物理和地球化学等数据,绘制新疆东天山 造山带的斑岩型铜钼多金属矿床前景并进行定量评 价。Zhang 等(2016)运用模糊证据权法得到预测区域 仅占总研究区的 5% 且成功识别了 65% 的研究区内的铁矿床。Porwal 等(2006)开发的一种基于模糊证据权重方法和模糊逻辑方法相结合的子模型,该子模型在确定高矿产潜力区域方面是有效的,可以作为矿产勘探的工具。在基于多元信息和信息综合技术的矿产资源定量评价与成矿预测领域,模糊证据权重法是行之有效且应用广泛的方法(Cheng, 2008a;黄秀等, 2010; Zhang et al., 2014; 陈风河等, 2015; 武进, 2017; 邓军等, 2021; Huo et al., 2022; 黄鑫怀等, 2023; 霍雨佳, 2023; 王佳营等, 2023)。

江西九瑞地区位于长江中下游铜多金属成矿带 中,该地区长期的构造作用、岩浆活动和成矿作用形 成了丰富的铜等多金属矿床,具有勘探铜矿的潜力。 但区域成矿地质条件复杂,致使传统的地质数据提取 找矿信息难度较大。笔者基于九瑞地区1:20万水系 沉积物地球化学采样数据、地质构造和控矿岩性等数据,在ArcGIS、GeoDAS等软件平台上,综合利用因子分析、多重分形反距离权重插值、C-A分形模型和模糊证据权等方法,构建九瑞地区模糊证据权模型,研究九瑞地区铜矿成矿潜力靶区,圈定可靠的成矿预测远景区,给予未来矿产勘探提供一定的参考意义。

1 地质背景

长江中下游成矿带位于扬子克拉通北缘,秦岭-大别造山带和华北克拉通以南。成矿带周边发育有 3条大型断裂,分别为东西向横贯成矿带南侧的阳新-常州断裂,西北缘呈 NW 向的襄樊-广济断裂以及东 北缘的郯庐断裂。研究区九瑞地区位于江西省北部, 属长江中下游成矿带之九瑞铜金矿集区(图1)。



图1 长江中下游成矿带简易地质图(据 Pan et al., 1999 修) Fig. 1 Simplified geological map of the Mid-Lower Yangtze metallogenic belt

九瑞地区地层发育较齐全,以古远古界为结晶基 底,中远古界为褶皱基底,晚震旦世以来的地层为盖 层,由老到新为奥陶系至第四系,其中主要出露奥陶 系至三叠系,研究区内矿床的形成、分布与地层关系 密切,区内铜矿床的主要赋矿地层为泥盆系五通组、 石炭系黄龙组和二叠系—三叠系大冶组(孔凡斌, 2014;徐耀明,2014)。

区域内曾经历过强烈的岩浆活动,主要活动时期

为燕山期,岩石类型以中酸性侵入岩为主(蒋少涌等, 2013),产状多为小型岩株、岩脉和岩枝。研究区内岩 体种类繁多,以花岗闪长斑岩和石英闪长玢岩为主, 另分布有石英斑岩、花岗细晶岩、闪长岩、辉绿岩等。 其中,燕山期花岗闪长斑岩是研究区内最主要的铜成 矿母岩。

研究区内褶皱、断裂构造发育,构造系统分级明显,严格控制了岩浆岩空间展布与矿床的分布。区域

构造主要为 NW 向与 NEE 向,其次为 NNW 与 NNE 向,断裂及其构成的网格状构造节点,控制和影响着 岩浆活动与成矿作用(图 2)。

九瑞地区成矿岩体及其围岩普遍经受热液蚀变 作用,矿床岩体多以岩体中心向外形成环状蚀变分带, 与铜矿化相关的蚀变主要有砂卡岩化、硅化、绿泥石 化。其中,据徐耀明(2014)制作的遥感蚀变光谱图可 以得知,在空间上绿泥石化与已知矿床表现的较为 密切。

矿体以层状、似层状、透镜状为主,铜矿主要类型有砂卡岩型、层控硫化物型、斑岩型等,区内截至2010年累计探明的铜储量为0.3万t(所颖萍,2013)。

在模糊证据权模型的构建的过程中,需要与成矿 相关的地质要素转化为证据图层参与模型的建立。 根据九瑞地区的地质背景,选择铜矿化的主要赋存地 层、铜成矿相关的花岗闪长斑岩、影响铜矿空间分布 区域断裂以及与铜矿空间分布的有关的绿泥石化蚀 变作为证据图层参与模型的构建。这些地质要素与 铜矿的分布和潜力密切相关,有助于模糊证据权模型 更精确地评估矿产资源的分布和潜力。此外,通过对 水系沉积物中提取的地球化学数据进行分析,可以识 别出与铜矿化相关的地球化学异常,通常这些异常指 示潜在的铜矿化区域。因此,地球化学异常也可以作 为一类证据图层用于模型的建立,以进一步提高对矿 产资源潜力的评估准确性。

2 研究方法

2.1 因子分析

因子分析是常用的多元统计分析方法之一,主要 用于降维,并可以通过确定用于解释所观察到的相关 矩阵所需的公共因子的适当数量和性质来计算出被 测变量的更简约结构(Fabrigar et al., 1999)。同时也可 以用于解决复杂的地质成因及矿化叠加问题,对叠加 地球化学场也有较好的分解作用(董庆吉等, 2008)。 因子分析步骤包括确定因子载荷、计算变量共同度、 因子旋转、方差贡献率和计算因子得分。其中,因子 得分是观测变量的线性组合,它可以代替原来的变量 用于后续的分析。

2.2 多重分形反距离权重法

在地球化学异常提取分析的过程中常有将点样本的属性转换为连续面的数值插值的处理过程。传统的插值方法(如普通克里金和反距离权重法)是空间插值分析中常用的方法。Cheng(2000)所提出的多重分形反距离权重插值(MIDW)在对地球化学数据处理在局部奇异性中表现出不错的优势。相比于传统的插值方法,多重分形方法能增强地球化学特征的预测能力,能更好的确定矿产勘探目标,其插值结果更







能对弱异常进行精细识别(Parsa et al., 2017)。有关局 部奇点指数和 MIDW 的更多详细信息见 Cheng(2007, 2008b)和 Zheng 等(2014)。MIDW 方法广泛应用于地 球化学异常找矿中,可以增强地球化学异常区域,有 助于地球化学勘探(Cheng, 2004, 2008b, 2015)。

MIDW 的方程式可以表示为公式(1):

$$\omega(\chi_0) = \varepsilon^{\alpha(\chi_0) - 2} \omega'(\chi_0) \tag{1}$$

式中: ω是多重分形权重; ε是单位单元大小的尺度(ε<1); α是奇异性指数。

2.3 C-A 分形模型

C-A 模型是地球化学异常识别的强有力的工具, 是人们常用的"地球化学异常建模的基本技术" (Carranza, 2009)。浓度-面积分形法由 Cheng 等(1994) 首先提出,是用来分选地球化学异常的。浓度-面积分 形法(C-A)是基于浓度值(量值的频率)的从背景中 分离异常值的方法,这些量值也可以是地球化学指标 的空间和几何特征。双对数坐标下的 C-A 图可以用 来建立浓度值大于 s 的面积 A(≥ s)和浓度值 s 之间 的幂律定律关系。从而可绘制出高、中、低异常区域 地图。

C-A模型表达方式见公式(2):

 $A(\rho \leq v) \propto \rho^{-\alpha_1}; \ A(\rho > v) \propto \rho^{-\alpha_2}$ (2)

式中: A(p)表示浓度大于或等于轮廓值p的区域; v是阈值; a₁和a₂是大于零的分形维数。这 2 个分形 参数可以从A(p)对p的对数-对数图中最佳拟合直线的 斜率来估计。

2.4 模糊证据权重

FWofE 将证据层定义为具有多值隶属函数(0 $\leq \mu(A) \leq 1$)而不是普通证据权重法中通常涉及的二元 或三元集合。二元和三元模式成为模糊集的特例,例 如 $\mu(A) = 1$ 或 0 对应于二元模式, $\mu(A) = 0$ 、0.5 和 1 对应于三元模式。具有隶属函数 1 和 0 的模糊证据 的 2 个子集在 FWofE 的实现中特别重要: A₁ = {A : $\mu(A) = 1$ }或 A₂ = {A : $\mu(A) = 0$ }。第一组 A₁ 是证据 的一部分,通常是勘探良好的区域,大部分矿床已被 发现。第二组是发现的矿床很少,发现更多矿床的机 会较小。假设与 A₁和 A₂ 相关的点事件(E)发生的条 件概率为 P[E|A₁]、P[E|A₁]、P[Ē|A₁]、P[E|A₂]、 P[E|Ā₂]、P[Ē|A₂] 和 P[Ē|Ā₂]。

E与任何A相关的模糊条件概率计算过程见公式(3)与公式(4):

 $P[E|\mu(A)] = \mu(B)P[E|A_1] + [1-\mu(A)]P[E]A_2]$ (3)

 $P[E|\mu(A)] = \mu(B)P[\bar{E}|A_1] + [1-\mu(A)]P[\bar{E}|A_2]$ (4)

其中带"bar"的字母表示没有发生事件或没有 证据。

模糊证据的权重计算过程见公式(5):

W[µ(A)]= logP[E|µ(B)] / P[Ē|µ(A)] (5) 式中: W⁺和 W 是普通证据权重法中涉及的 2 个 普通权重; W₀ 是先验权重。公式(5)具有以下特性:
W[µ(A)] = W⁺, 假设µ(A) = 1 和 W[µ(A)] = W, 假设 µ(A) = 0 和 W[µ(A)] = W₀, 假设µ(A) = 1 / 2 和 A₁ + A₂ = Ω(整个研究区域)。

在条件独立于不同证据 A 和 B 的假设下关于事件 E 的发生, 给定 A 和 B 的 E 的 logit 计算过程见公式(6): logit[E|μ(A), μ(B)] =W₀+ W[μ(A)] + W[μ(B)] (6)

以应用反演变换将 logit转换回后验概率 P[E|μ(A),μ(B)],也可以计算后验概率的标准偏差, 以测试结果的显著性。模糊证据权重方法的实施步 骤概括为6个步骤:φ确定研究目标,如预测给定类型 但未发现矿产的空间位置。κ确定与目标相关的空间 层(属性),以便他们可以用于评估目标。λ提取与目 标相关的证据层,用隶属度函数表示证据层的可信度。 μ计算模糊证据层的权重(衡量各个证据层对评估目 标的重要性)。v综合多个模糊证据层,计算后验概率 形成矿产资源潜力分布图。o模型检验和预测区 解释。

2.5 接受者操作特征曲线(ROC)

接收者操作特征曲线(Receiver Operating Characteristic Curve, 简称 ROC)自被创建以来已被用于各个 学科,是一种可以用来评价分类器性能的可视化方法 (Egan, 1975; Zou et al., 2007; Swets, 2014)。此外, ROC 也可以用于测试空间预测模型的有效性 (Nykänen, 2008; Chauhan et al., 2010; Rossi et al., 2010)_o 其主要原理是将异常空间分布模式与成矿有利要素 或与已知矿床(点)进行比较,并通过相关统计指标来 度量两者间的空间对应关系(周光锋, 2021)。ROC曲 线通过反映真阳性(True Positive, TP, 模型将阳性分为 阳性)和假阳性(False Positive, FP,模型将阴性分类为 阳性)以及真阴性(True Negative, TP, 模型将阴性分类 为阴性)和假阴性(False Negative, FN,模型将阳性分 类为阴性)的权衡关系作为一种评估分类器性能的方 法, ROC曲线是纵轴上的灵敏度(真阳性率: TP / (TP+FN))与横轴上的1-特异性(假阳性率:FP/(FP+ TN))的比较图,其曲线下面积(Area Under the Curve, 简称 AUC)可用作诊断测试准确性的度量,也可用于 测量空间预测模型的性能。AUC 值可能在0到1之

169

间变化,如果 AUC 值等于 0.5,则分类性能相当于完 全随机猜测;而如果 AUC 值等于 1,则分类性能完美, 即分类器可以正确分类所有样本(图 3)。分类器的 AUC 值通常介于 0.5 和 1 之间,其值越高代表的预测 效果越好(Nykänen et al., 2015; Chen et al., 2016)。



图3 ROC 曲线示例图 Fig. 3 Example plot of ROC curve

3 数据与模糊证据权模型构建

3.1 数据来源

本研究用于建立预测模型的数据集有地质数据、

化探异常数据和遥感解译数据,数据包括铜矿床空间 分布位置数据、九瑞地区断裂数据、主要赋矿地层数 据、花岗闪长斑岩分布数据、绿泥石化蚀变数据、水 系沉积物化探异常空间分布数据,这些数据经过处理 后作为证据图层输入模糊证据权模型中。其中,断裂、 地层、花岗闪长斑岩的数据提取自1:25万的九瑞地 区构造图。绿泥石化蚀变数据来自徐耀明(2014)对 九瑞地区遥感蚀变光谱图的解译结果。化探异常数 据来自1:20万水系沉积物地球化学数据的分析 结果。

此外,1:20万水系沉积物地球化学采样数据由 江西省地质局第十地质大队按照采样密度每4km²一 个样品点位采集所得,且225件样品点基本均匀覆盖 整个研究区域(图4)。各微量元素检出限的测定包括: 电感耦合等离子体光谱法测定 Be、Co、Cr、Cu、Ba、 K₂O、La、Li、Mn、Nb、Ni、P、Sr、Th、V、Y、Ti、Zn、 Zr 的浓度;掩蔽光谱法测定 As、Bi、Cd、Sb 和 Pb 的浓 度;用比色法测定 U的浓度;催化极谱法测定 Mo 和 W 的浓度;Ag 和 Au 的浓度通过原子吸收光谱法测 定 B、F 和 Hg 的浓度分别通过发射光谱法、离子选择 电极法和冷原子法测定。所有 32 个元素的检测限制 如表1所示。



图4 水系沉积物样品采样点分布图

Fig. 4 Steam sediment sample location map

3.2 数据预处理

对水系沉积物样品的 32 个元素进行分析处理, 用以提取九瑞地区的铜矿化异常分布图作为构建模 糊证据权模型的证据图层。首先对标准化后的数据 进行因子分析。因子分析方差最大正交旋转因子载 荷表2显示了各种因素的组成,其中F1因子中的Cr、

表 1 32 种元素的检出限表

|--|

序号	元素	检出限	序号	元素	检出限
1	Ag	0.01	17	Mo	0.5
2	As	2.82	18	Nb	5
3	Au	0.000 3	19	Ni	5
4	В	5	20	Р	30
5	Ba	10	21	Pb	5.4
6	Be	0.5	22	Sb	0.2
7	Bi	0.16	23	Sn	0.14
8	Cd	0.1	24	Sr	5
9	Co	1	25	Th	5.1
10	Cr	7.2	26	Ti	30
11	Cu	1	27	U	1
12	F	13	28	V	2
13	Hg	0.01	29	W	0.5
14	La	10	30	Y	10
15	Li	5	31	Zn	10
16	Mn	30	32	Zr	10

注:元素含量为10%。

Co、Ni、Ti、V为亲铁元素,主要存在于基性岩、超基 性岩中,可能表明了铁的矿化。因子F2含有Cu、Au、 Bi、Mo、Pb、Sb、W是研究区主要的成矿元素,相应 的Cu、Au、Mo元素属于砂卡岩-斑岩型铜钼金硫成矿 亚系列,而Pb、Sb、Bi为亲铜元素,W则常产出于砂 卡岩型铜矿中,因此F2因子可以作为研究区主要铜 成矿元素空间聚集的综合指标。因子F3-F7与区域成 矿无明显关系,对于成矿的指示性不强。

通过 GeoDAS 软件,使用多重分形 IDW 方法对 F2 因子得分(Fac2)的空间分布图进行插值(图 5),发 现其现有的矿点与异常区域吻合程度较差,说明只进 行插值不足以从背景中提取异常,需要进一步分析来 提高异常区域提取的准确性。

将浓度-面积(C-A)模型应用于因子 F2 多重分 形 IDW 的结果进行地球化学异常与背景分离。为了 研究元素含量与对应面积之间的分形特征值,通过 GeoDAS 软件处理,做出对应的浓度-面积双对数散点 图。在双对数图上背景值和异常值可以对应于不同 的斜率值,不同线段所对应的分界值可作为区分背景 和异常的临界值(图 6)。经过分析,利用最小二乘拟 合将图上的离散点拟合成4条直线,从左往右分别表 示为背景、弱异常、异常和高异常,最终得到研究区 Cu 矿化异常分级图(图 7)。

表 2 R 型因子分析的正交旋转因子载荷矩阵表

Tab. 2 Orthometric rotating factor loading matrix for R-factor analysis

亦具	因子载荷									
又里	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7			
Ag	0.101	-0.031	0.954	-0.065	0.030	0.039	-0.062			
As	0.059	0.329	-0.099	0.854	-0.039	-0.027	-0.203			
Au	-0.012	0.717	-0.041	0.007	-0.026	0.005	-0.069			
В	-0.303	-0.072	-0.021	-0.072	0.716	0.163	-0.104			
Ва	0.101	-0.031	0.954	-0.065	0.030	0.039	-0.062			
Be	0.910	-0.023	0.175	0.068	0.015	0.170	-0.016			
Bi	-0.025	0.941	-0.006	0.062	-0.017	-0.032	0.007			
Cd	0.055	0.249	-0.098	0.917	-0.099	-0.014	0.102			
Co	0.767	-0.006	0.093	0.435	0.224	-0.021	-0.112			
Cr	0.831	0.001	0.007	-0.061	-0.013	0.082	0.036			
Cu	-0.089	0.786	0.022	0.324	-0.022	0.014	0.288			
F	0.835	0.043	-0.057	-0.051	-0.087	0.102	0.123			
Hg	0.063	0.221	0.023	0.196	0.100	0.173	-0.443			
La	0.235	-0.093	0.068	-0.125	0.153	0.760	0.047			
Li	0.890	-0.019	0.124	0.013	0.059	0.177	-0.038			
Mn	0.489	0.005	0.065	0.328	0.198	0.016	-0.212			
Mo	-0.009	0.489	0.015	0.229	0.015	0.044	0.679			
Nb	0.254	0.104	0.118	-0.045	0.611	0.123	0.029			
Ni	0.875	-0.069	0.049	-0.070	-0.026	0.181	0.052			
Р	0.464	-0.049	0.417	0.025	-0.226	-0.218	0.100			
Pb	0.075	0.918	-0.014	0.050	-0.002	-0.026	-0.157			
Sb	0.048	0.926	-0.062	0.169	0.022	-0.059	-0.053			
Sn	0.274	0.287	0.064	0.053	-0.094	0.572	0.068			
Sr	0.209	0.058	0.736	-0.077	-0.411	-0.093	0.068			
Th	0.332	-0.015	-0.241	0.010	0.603	-0.116	0.094			
Ti	0.569	0.011	0.586	0.006	0.252	-0.002	-0.110			
U	0.170	-0.022	-0.193	-0.058	0.073	0.089	0.289			
V	0.931	0.042	0.146	0.049	0.036	0.134	0.032			
W	-0.077	0.657	0.171	0.144	0.064	-0.022	0.444			
Y	0.108	-0.216	-0.181	0.031	0.152	0.739	-0.141			
Zn	0.026	0.049	-0.017	0.959	-0.055	-0.023	0.041			
Zr	-0.570	-0.070	-0.166	-0.098	0.546	0.097	0.007			

注: 该因子分析采用的提取方法为主成分分析法,旋转方 法为Kaiser标准化最大方差法,旋转在七次迭代后已经收敛。

此外,地质特征一定范围缓冲区与成矿是有关联的,并可以提供重要的勘探指南,所以可以对这些地质要素"延伸"一定的距离作为研究的证据图层 (Zhang et al., 2016)。对于地层、断裂、花岗闪长斑岩和绿泥石化蚀变等地质要素,可以构建相应的缓冲区 作为证据图层。根据已知矿床与各地质要素的空间



图5 因子2得分的多重分形反距离权重插值结果图 Fig. 5 Multifractal IDW result for the factor 2 scores



图6 浓度与面积的双对数图

Fig. 6 Log-log plot of concentration versus area

关系,当主要赋矿地层(泥盆系五通组、石炭系黄龙组和二叠系—三叠系大冶组)的多环缓冲区为1km、花岗闪长斑岩的多环缓冲区为0.5km、断裂的多环缓冲区为1.3km、绿泥石化蚀变的多环缓冲区为0.8km时,平均有85%以上的矿床落入各个地质要素的多环缓冲区内。在这些缓冲区范围外,随着距离的增加,所包含的矿床的数量增加极少。因此,这些距离可以视为最有利距离,即在这些缓冲距离内与已知矿床的空间相关性最大。经过数据预处理后,共得到了5个建



图7 C-A 分形模型识别的异常图 Fig. 7 Anomaly map identified by the C-A fractal model

立预测模型所需的证据层:①花岗闪长斑岩多环缓冲 区证据层。②断裂多环缓冲区。③主要赋矿地层多

第1期

环缓冲区证据层。④地球化学异常证据层。⑤绿泥 石化蚀变多环缓冲区(图 8)。





3.3 模糊证据权模型

在构建模糊证据权模型前,需要在 GeoDAS 软件 对研究范围和相关参数进行定义,研究范围可以分为 训练区域和预测区域进行定义,一般而言训练区域和 预测区域为同一块区域。此外,为了确保每个栅格单 元大小包含并仅包含一个矿床,设置研究区的面积单 元大小为 400 000 地图单元,选择 11 个已知矿床作为 训练图层,其先验概率为 0.003 6。

在设置的训练参数基础上,对上述 5 种证据图层 分别进行模糊权重计算来构建模糊证据图层。普通 证据权方法一般是以对比度 C 与 C 的标准偏差 S(C) 的比值 t(分布 t 值, t = C/S(C))的极大值作为各证据 层二值化的阈值,该阈值将各证据图层分成截然不同 的二值图,即阈值之前的分类部分对成矿有利,赋值 为 1,阈值之后的分类部分对成矿不利,赋值为 0。而 对于模糊证据权,证据层由隶属度函数(MSF)进行重 分类,隶属度函数是描述某个元素或时间对于某个特 定集合(或模糊集合)的隶属程度或归属度,在地质中 可以描述地质数据中的不确定性和模糊性并对地质数据进行度量,因此可以使用 MSF 在闭区间 [0,1]上 任意取值对证据图层的确定性进行度量,根据已知矿 点与不同分类的关系赋予不同 MSF,一般的根据矿床 在不同分类上的分布情况确定各类的 MSF 取值,各 证据图层的 MSF 取值如图 9 所示,其计算的模糊权重 值如表 3 所示。

4 结果与讨论

4.1 预测结果

每一个模糊证据图层刻画了与已知矿点的空间 关系,构建模糊证据图层的过程是训练和学习的过程, 综合 5 个模糊证据图层创建后验概率图是达到预测 和评价目标的必须过程。根据各证据图层的模糊证 据权重,综合 5 个证据图层,进行后验概率的计算,得 到后验概率图(图 10)。从后验概率图的结果来看,已 知的 11 个矿床的位置都具有较高的后验概率,城门

173



图9 MSF 分类的证据图层

Fig. 9 MSF for evidences

表 3	各证据层隶属度表(MSF)及模糊证据权重计算表

Tab. 3 Table of membership of each evidence layer (MSF) and calculation of fuzzy weights of evidence

缓冲距离分类		主要赋矿地层		断裂		花岗闪长斑岩		绿泥石化蚀变		地球化学异常分类		C-A分形模型	
分类值	缓冲 距离 (m)	隶属度	证据 权重	隶属度	证据 权重	隶属度	证据 权重	隶属度	证据 权重	分类值	C-A分形	隶属度	证据 权重
1	100	1	0.60	1	0.37	1	4.06	1	2.05	1	高异常	1	2.06
2	200	1	0.60	1	0.37	0.67	3.46	1	2.05	2	异常	0.67	2.00
3	300	1	0.60	1	0.37	0.33	2.64	0.8	1.99	3	弱异常	0.33	1.83
4	400	1	0.60	1	0.37	0	0.69	0.6	1.91	4	背景	-0.37	-0.37
5	500	0.8	0.58	0.86	0.36	0	0.69	0.4	1.78	5	-	-	-
6	600	0.6	0.55	0.71	0.36	-	-	0.2	1.56	6	-	-	-
7	700	0.4	0.38	0.57	0.35	-	-	0	1.03	7	-	-	-
8	800	0.2	-0.03	0.43	0.34	-	-	0	1.03	8	-	-	-
9	900	0	-0.03	0.29	0.32	-	-	-	-	9	-	-	-
10	1 000	0	-	0.14	0.30	-	-	-	-	10	-	-	-
11	1 100	-	-	0	0.26	-	-	-	-	11	-	-	-
12	1 200	-	-	0	0.26	-	-	-	-	12	-	-	-
13	1 300	-	-	0	0.26	-	-	_	-	13	-	-	-

注:"一"为空值。

山、武山、邓家山等矿床的矿体均位于后验概率高值 区域。这表明后验概率高值区与已知铜矿床的分布 存在显著的一致性,进一步验证了模糊证据权模型预 测结果的准确性。高后验概率值的区域并不局限于 已知矿床的分布范围内,表明在已知矿床范围内或周 边可能具有成矿潜力。根据所得的后验概率图的后 验概率值的大小及矿床的分布情况,将研究区划分3 个一级预测远景区和4个二级预测远景区,一级远景 区与已知矿床在空间上的分布高度吻合。

4.2 不确定性分析

经过邻域分析,得出距离成矿最有利的距离为

7.5 km,在该距离内的铜矿床密度达到65%,并建立了 相应的有利成矿区域(图 11 白色区域),缓冲区以外 的绿色区域代表负样本选择区域,并通过随机选点的 方式,选取了与已知铜矿床相等数量的非矿点作为负 样本。以研究区内已知的铜矿床作为正样本(True Positive, TP),在非矿点区域随机生成与已知铜矿床相 等数量的非矿点作为负样本(True Negative, TN)。基 于这两类正样本点和负样本点对所得的后验概率预 测模型进行 ROC 曲线分析,得到其 ROC 曲线图以及 AUC 值为 0.983(图 12),说明已知矿床与后验概率高 值部分在空间上存在较强的相关性,表明了模糊证据



图10 九瑞地区找矿后验概率及远景区分级图

Fig. 10 Map of posterior probability and hierarchical prospective in the Jiurui region



图11 正、负样本点空间分布图 Fig. 11 Distribution map of positive and negative samples



图12 预测模型 ROC 曲线

Fig. 12 ROC curve of the predictive model

权模型对九瑞地区铜矿床预测具有良好的预测性能。

此外,前人对九瑞地区矿床控制因素的研究表明, 九瑞地区内铜矿除了受到区域性深大断裂的组成的 菱形网格结点控制外,还受"四带一面"控制,即岩 体与围岩接触带、层间破碎带、裂隙带与断裂带及不 同岩性界面或沉积间断面控制,说明九瑞地区的岩体 与断裂控制铜矿床的空间位置。将花岗闪长斑岩和 断裂叠加在后验概率图上表明(图 10),预测的远景区 中花岗闪长斑岩发育,说明花岗闪长斑岩是研究区内 最主要的铜成矿母岩,可以将预测远景区中花岗闪长 斑岩发育区域纳入下一步的 Cu 勘探中进一步调查。 同时,圈定的二级远景区域表明即使有花岗闪长斑岩 分布的区域,但是断裂发育较差,其后验概率会较低, 说明九瑞地区铜成矿是受到花岗闪长斑岩和断裂共 同影响的。模糊证据权重计算得到的高值后验概率 区域和圈定的3个一级远景区中,普遍有断裂和花岗 闪长斑岩分布,表明基于浓度-面积分形和模糊证据权 相结合的模型,具有一定的找矿指导意义。

5 结论

(1)研究采用因子分析对江西省九瑞地区的地球 化学数据进行处理,结果显示Cu、Au、Bi、Mo、Pb、Sb、 W等元素组合在因子F2中具有指示成矿的作用,其 浓度-面积分形模型提取的铜矿化异常可以作为模糊 证据权模型的有效证据图层。

(2)基于模糊证据权模型综合地质、地球化学、遥感数据等多源信息,生成了后验概率图和预测远景区,这为江西九瑞地区铜找矿勘查提供决策依据。

(3)综合研究结果表明,江西九瑞地区仍有较大 铜矿勘查潜力。铜矿分布受花岗闪长斑岩和断裂共 同控制影响,在未来勘查找矿中应该对这些控制因素 加以重视。

参考文献(References):

- 陈风河,王建兴,董国明,等.模糊证据权法在承德多金属矿产资源预测中的应用[J].新疆有色金属,2015,38(2):76-78+82.
- CHEN Fenghe, WANG Jianxing, DONG Guoming, et al. Application of fuzzy weight of evidence method in prediction of polymetallic mineral resources in Chengde[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2015, 38(2): 76–78+82.
- 成秋明, 陈志军, Ali Khaled. 模糊证据权方法在镇沅 (老王寨) 地区金矿资源评价中的应用[J]. 地球科学 (中国地质大学 学报), 2007, 32(2): 175-184.
- CHENG Qiuming, CHEN Zhijun, Ali Khaled. Application of Fuzzy Weigh of Evidence Method in Mineral Resource Assessment for Gold in Zhenyuan District, Yunnan Province, China[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2007, 32(2): 175–184.
- 邓军,战明国,周伟金,等.基于模糊证据权法的广西典型金矿 矿产定量预测[J].地质力学学报,2021,27(3):374-390.
- DENG Jun, ZHAN Mingguo, ZHOU Weijin, et al. Quantitative prediction of mineral resources in typical gold deposits in Guangxi, China using a fuzzy weights of evidence method[J]. Chinese Journal of Geomechanics, 2021, 27(3): 374–390.
- 董庆吉,陈建平,唐宇.R型因子分析在矿床成矿预测中的应用——以山东黄埠岭金矿为例[J].地质与勘探,2008, 44(4):64-68.
- DONG Qingji, CHEN Jianping, TANG Yu. Application of R type Factor Analyses in Mineralization prognosis: by an example of Huangbuling Gold deposit, Shandong province [J]. Geology and Exploration, 2008, 44(4): 64–68.
- 黄鑫怀,李红利,李增华,等.基于模糊证据权法的江西相山盆 地火山岩型铀矿成矿潜力评价[J].世界核地质科学,2023, 40(2):226-235.
- HUANG Xinhuai, LI Hongli, LI Zenghua, et al. Application of fuzzy weights of evidence method to prediction of mineralization in the volcanic-type uranium deposit in Xiangshan basin, Jiangxi[J]. World Nuclear Geology, 2023, 40(2): 226–235.
- 黄秀,张钊,陈建平,等.混合模糊证据权模型在河北承德煤炭资源预测中的应用[J].地质通报,2010,29(7):1075-1081.
- HUANG Xiu, ZHANG Zhao, CHEN Jianping, et al. Application of hybrid fuzzy weights of evidence model in mineral resource assessment for coal in Chengde area, Hebei, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(7): 1075–1081.
- 霍雨佳. 基于模糊证据权的川滇相邻地区铜矿预测[D]. 吉林: 吉林大学, 2023.
- HUO Yujia. Prediction of Copper Minerals in Sichuan-Yunnan Adjacent Region based on Fuzzy Evidence Weight [D]. Jilin: Jilin University, 2023.
- 蒋少涌,徐耀明,朱志勇,等.九瑞矿集区燕山期构造-岩浆作用

及其与铜金多金属成矿关系研究[J]. 岩石学报, 2013, 29(12): 4051-4068.

- JIANG Shaoyong, XU Yaoming, ZHU Zhiyong, et al. Study on Mesozoic tectonics and granitic magmatism and their relationship with Cu-Au mineralization in the Jiurui ore district, Jiangxi province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(12): 4051–4068.
- 孔凡斌. 江西九瑞铜多金属矿深部成矿规律与找矿预测研究 [D]. 南京: 南京大学, 2014.
- KONG Fanbin. Deep copper polymetallic metallogenic regularities and prospecting studies of favorable locations in Jiurui region of Jiangxi province[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- 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.
- 欧阳渊,刘洪,李光明,等.基于随机森林算法的找矿预测—— 以冈底斯成矿带西段斑岩-浅成低温热液型铜多金属矿为 例[J].中国地质,2023,50(2):303-330.
- OUYANG Yuan, LIU Hong, LI Guangming, et al. 2023. Mineral search prediction based on Random Forest algorithm: A case study on porphyry-epithermal copper polymetallic deposits in the western Gangdise meatallogenic belt[J]. Geology in China, 2023, 50(2): 303–330.
- 所颖萍. 江西九瑞地区成矿时空结构与铜金成矿作用[D]. 南京:南京大学, 2013.
- SUO Yingping. The Metallogensis and space-time structure of copper and gold in Jiurui district, Jiangxi province[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- 王佳营,曾威,张祺,等.模糊证据权方法在纳米比亚白岗岩型
 铀 矿 预 测 中 的 应 用[J]. 地 质 通 报, 2023, 42(8): 1318-1333.
- WANG Jiaying, ZENG Wei, ZHANG Qi, et al. Application of fuzzy weights of evidence method in metallogenic prediction for alaskite-type uranium deposits in Namibia[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(8): 1318–1333.
- 王兆强,张岩.长江中下游成矿带鸡笼山砂卡岩型铜金钼矿床 花岗闪长斑岩对成岩-成矿的指示:来自地球化学和锆石 U-Pb 年龄的证据[J].地质通报,2023,42(9):1480-1493.
- WANG Zhaoqiang, ZHANG Yan. Geochemistry and zircon U-Pb age of granodiorite porphyry: Constraints on diagenetic and metallogenic processes of the Jilongshan Cu-Au-Mo deposit, Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt, China[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(9): 1480–1493.
- 武进.基于模糊证据权的找矿远景区预测方法研究与应用-以 西藏米拉山为例[D].成都:成都理工大学,2017.
- WU Jin. Research and application of the forecasting method based on fuzzy evidence right in the search for distant scenic spot-Mila mountain as an example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- 徐耀明. 江西九瑞矿集区燕山期岩浆岩成岩成矿作用地球化学 及矿床预测研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.

- XU Yaoming. Geochemistry of late Mesozoic magmatic rocks and related mineralizations and mineral prospecting in the Jiurui district of Jiangxi province[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- 薛琮一, 王嘉伟, 杨征, 等. 新疆和田布雅煤矿一带水系沉积物 测量地球化学特征及找矿方向[J]. 西北地质, 2020, 53(4): 66-72.
- XUE Congyi, WANG Jiawei, YANG Zheng, et al. A Review of Geochemical Characteristics and Prospecting Direction of Stream Sediment of Buya Coal Mine in Hetian, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(4): 66–72.
- 张津瑞,陈华,任军平,等.矿产资源潜力评价方法对比及其发 展趋势探讨[J].西北地质,2023,56(2):292-305.
- ZHANG Jinrui, CHEN Hua, REN Junping, et al. Mineral Resource Assessment Methods Comparison and Its Development Trend Discussion[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 292-305.
- 周光锋.基于机器学习的个旧地区锡铜多金属矿成矿预测[D]. 北京:中国地质大学(北京),2021.
- ZHOU Guangfeng. Mapping mineral prospectivity for Tin-Copper polymetallic mineralization by maschine learning methods in Gejiu, Yunnan province, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- Agterberg F P. Computer Programs for Mineral Exploration[J]. Science, 1989, 245(4913): 76–81.
- Agterberg F P, Bonham-Carter G F. Statistical applications in the earth sciences [M]. Canada: Geological Survey of Canada, 1990.
- Agterberg F P, Bonharn-Carter G F. Weights of Evidence Modeling And Weighted Logistic Regression For Mineral Potential Mapping[M]. New York: Oxford University Press, 1994.
- Ali K, Cheng Q M, Chen Z J. Multifractal power spectrum and singularity analysis for modelling stream sediment geochemical distribution patterns to identify anomalies related to gold mineralization in Yunnan Province, South China [J]. Geochemistry:Exploration Environment Analysis, 2007, 7(4): 293–301.
- Ayres R U, Ayres L W, Råde I. The Life Cycle of Copper, Its Co-Products and Byproducts [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003.
- Carranza E J M. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS[M]. Boston: Elsevier, 2009.
- Chauhan S, Sharma M, Arora M K, et al. Landslide Susceptibility Zonation through ratings derived from Artificial Neural Network[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12(5): 340–350.
- Chen Y L, Wu W. A prospecting cost-benefit strategy for mineral potential mapping based on ROC curve analysis[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 74: 26–38.
- Cheng Q M. GeoData Analysis System (GeoDAS) for mineral exploration: user's guide and exercise manual[C] .Canada: Material for the training workshop on GeoDAS held at York University, 2000.
- Cheng Q M. A New Model for Quantifying Anisotropic Scale Invariance and for Decomposition of Mixing Patterns [J]. Mathematical Geology, 2004, 36(3): 345–360.

- Cheng Q M. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China[J]. Ore Geology Reviews, 2007, 32(1-2); 314–324.
- Cheng Q M. Non-Linear Theory and Power-Law Models for Information Integration and Mineral Resources Quantitative Assessments[J]. Mathematical Geosciences, 2008a, 40(5): 503–532.
- Cheng Q M. Modeling Local Scaling Properties for Multiscale Mapping[J]. Vadose Zone Journal, 2008b, 7(2): 525–532.
- Cheng Q M. Multifractal interpolation method for spatial data with singularities[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2015, 115(3): 235–240.
- Cheng Q M, Agterberg F P. Fuzzy weights of evidence method and its application in mineral potential mapping[J]. Natural Resources Research, 1999, 8(1): 27–35.
- Cheng Q M, Agterberg F P, Ballantyne S B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1994, 51(2): 109–130.
- Cheng Q M, Zhang S Y. Fuzzy weights of evidence method implemented in GeoDAS GIS for information extraction and integration for prediction of point events[C]. Toronto: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002, 5: 2933-2935.
- Egan J P. Signal detection theory and ROC-analysis[M]. New York: Academic Press, 1975.
- Fabrigar L R, Wegener D T, MacCallum R C, et al. Evaluating the use of exploratory factor analysis in psychological research[J]. Psychological Methods, 1999, 4(3): 272–299.
- Hassanpour S, Afzal P. Application of concentration–number (C–N) multifractal modeling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(3): 957–970.
- HUO Yujia, WANG Yongzhi, WU Qinghua, et al. Analysis method of gold reserve mineral deposit in Yunnan Province based on fuzzy evidence weight[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(6): 2552–2561.
- Xiao F, Wang K Q, Hou W S, et al. Prospectivity Mapping for Porphyry Cu–Mo Mineralization in the Eastern Tianshan, Xinjiang, Northwestern China[J]. Natural Resources Research, 2020, 29(1): 89–113.
- Yang S Y, Jang S Y, Li L, et al. Late Mesozoic magmatism of the Jiurui mineralization district in the Middle–Lower Yangtze River Metallogenic Belt, Eastern China: Precise U–Pb ages and geodynamic implications[J]. Gondwana Research, 2011, 20(4): 831–843.
- Keller C P. Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS[J]. Computers & Geosciences, 1995, 21(9): 1110–1112.
- Li H L, Li Z H, Ouyang Y P, et al. Application of principal component analysis and a spectrum-area fractal model to identify geochemical anomalies associated with vanadium mineralization in northeastern Jiangxi Province, South China[J]. Geochemistry: Exploration Environment Analysis, 2022, 22(3): 2021–090.

Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. Deutschland:

W. H. Freeman and Company, 1982.

- Mudd G. M, Jowitt S M. Growing Global Copper Resources, Reserves and Production: Discovery Is Not the Only Control on Supply[J]. Economic Geology, 2018, 113(6): 1235–1267.
- Nykänen V. Radial Basis Functional Link Nets Used as a Prospectivity Mapping Tool for Orogenic Gold Deposits Within the Central Lapland Greenstone Belt, Northern Fennoscandian Shield[J]. Natural Resources Research, 2008, 17(1): 29–48.
- Nykänen V, Lahti I, Niiranen T, et al. Receiver operating characteristics (ROC) as validation tool for prospectivity models — A magmatic Ni-Cu case study from the Central Lapland Greenstone Belt, Northern Finland[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 71: 853–860.
- Pan Y M, Dong P. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: intrusion- and wall rockhosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. Ore Geology Reviews, 1999, 15(4): 177–242.
- Parsa M, Maghsoudi A, Yousefi M, et al. Multifractal interpolation and spectrum-area fractal modeling of stream sediment geochemical data: Implications for mapping exploration targets[J]. Journal of African Earth Sciences, 2017, 128; 5–15.
- Porwal A, Carranza E J M, Hale M. A Hybrid Fuzzy Weights-of-Evidence Model for Mineral Potential Mapping[J]. Natural Resources Research, 2006, 15(1): 1–14.
- Rossi M, Guzzetti F, Reichenbach P, et al. Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts[J]. Geomorphology, 2010, 114(3): 129–142.
- Swets J A. Signal Detection Theory and ROC Analysis in Psychology and Diagnostics Psychology Press[M]. New York: Psychology Press, 2014.
- Zhang D J, Agterberg F, Cheng Q M, et al. A Comparison of Modified Fuzzy Weights of Evidence, Fuzzy Weights of Evidence, and Logistic Regression for Mapping Mineral Prospectivity[J]. Mathematical Geosciences, 2014, 46(7): 869–885.
- Zhang Z J, Zuo R G, Xiong Y H. A comparative study of fuzzy weights of evidence and random forests for mapping mineral prospectivity for skarn-type Fe deposits in the southwestern Fujian metallogenic belt, China[J]. Science China Earth Sciences, 2016, 59(3): 556–572.
- Zheng Y Y, Sun X, Gao S B, et al. Analysis of stream sediment data for exploring the Zhunuo porphyry Cu deposit, southern Tibet[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 143: 19–30.
- Zou K H, O'Malley A J, Mauri L. Receiver-Operating Characteristic Analysis for Evaluating Diagnostic Tests and Predictive Models[J]. Circulation, 2007, 115(5): 654–657.
- Zuo R G, Carranza E J M., Cheng Q. Fractal/multifractal modelling of geochemical exploration data[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 122: 1–3.
- Zuo R G, Xia Q L, Zhang D J. A comparison study of the C–A and S–A models with singularity analysis to identify geochemical anomalies in covered areas [J]. Applied Geochemistry, 2013, 33: 165–170.