

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.02.013

基于分形理论的蚀变异常遥感解译——以广东阳山县为例

祝一丹, 吴志春*, 马粉玲, 李华亮, 秦耀祖

ZHU Yi-Dan, WU Zhi-Chun*, MA Fen-Ling, LI Hua-Liang, QIN Yao-Zu

东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013
College of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China

摘要: 围岩蚀变异常是热液型矿床的重要找矿标志, 运用遥感技术解译提取围岩蚀变信息是辅助地质找矿的重要手段。本文采用主成分分析法提取广东阳山地区 Landsat-5 的 TM 遥感影像中铁染和泥化蚀变信息, 对影像中所提取的异常主成分进行“像元-面积”划分并统计像元个数, 再将异常阈值进行分形非线性划分, 得到更为精准的分级方法。门限法是基于突变点选择阈值进行等级划分, 在提取蚀变异常的结果中往往会包含大量的背景信息, 利用分形理论确定临界值进行分级减少了这些信息的影响。本次研究通过门限法和分形方法两种划分方法对研究区的蚀变异常进行对比, 最后根据研究区蚀变异常信息的分形特征, 利用求和方法对研究区的铁染和泥化蚀变异常信息进行分级。结果表明, 相对于门限法, 在遥感蚀变信息提取中分形方法加强了阈值选取的准确度, 并发现研究区泥化蚀变与铁染蚀变主要分布于东北部及北部区域, 其它区域小面积离散分布, 这可为矿产勘查工作提供更好的技术支持。

关键词: 蚀变异常; 遥感解译; 分形理论; 主成分分析法; 门限法; 广东阳山县

中图分类号: P627

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)02-0380-13

Zhu Y D, Wu Z C, Ma F L, Li H L and Qin Y Z. 2024. Remote Sensing Interpretation of Alteration Anomaly Based on Fractal Theory: A Case Study of Yangshan County, Guangdong Province. *South China Geology*, 40(2): 380-392.

Abstract: The abnormal information of wall rock alteration is an important prospecting indicator for hydrothermal deposits. The interpretation of wall rock alteration information by remote sensing technology is an important method to extract alteration information. This article used principal component analysis to extract iron contamination and mud alteration information from Landsat-5 TM remote sensing images in the Yangshan area of Guangdong Province. The abnormal principal components extracted from the images were divided into "pixel-area" and the number of pixels was counted. Then, the abnormal threshold was divided into fractal nonlinear divisions to achieve a more accurate classification method. The threshold method is based on the mutation point selection threshold for grading. The results of extracting alteration anomalies often contain a large amount of background information, impact of which was reduced by using the fractal theory to determine the critical value for grading. This study compared threshold method with fractal method used in the

收稿日期: 2024-02-23; 修回日期: 2024-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41802247); 江西省自然科学基金项目(20212BAB211001); 核资源与环境国家重点实验室开放基金项目(2022NRE14); 江西省博士后择优资助项目(2021KY52); 云南省地球系统科学重点实验室开放课题(ESS2021005)

第一作者: 祝一丹(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事遥感地质解译研究, E-mail: 2904320434@qq.com

通讯作者: 吴志春(1986—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事遥感地质解译、三维地质建模研究, E-mail: 563970964@qq.com

alteration anomalies in the study area. Finally, based on the fractal characteristics of the alteration anomaly information, the summation method was used to classify the iron staining and mud alteration anomaly information in the study area. The results show that compared with the threshold method, the fractal method enhances the accuracy of threshold selection in the extraction of remote sensing alteration information. It is found that the mud alteration and iron staining alteration in the study area are mainly distributed in the north-eastern and northern regions, and are scattered in a small area in other regions, which provides better technical support and data support for mineral exploration.

Key words: alteration anomaly; remote sensing interpretation; fractal theory; principal component analysis; threshold method; Yangshan county, Guangdong Province

运用遥感技术解译围岩蚀变信息具有速度快、效率高、成本低等优势,随着遥感技术的快速发展和各类高分辨率影像的获取难度降低,遥感技术在解译围岩蚀变信息以辅助地质找矿工作中扮演着越来越重要的角色。目前,利用遥感数据对铁染和泥化蚀变异常信息提取的方法主要有波段彩色合成、波段比值、主成分分析、光谱角和像元分解等(吴志春等,2020),其中主成分分析法具有实现简单、效率高、效果好等优点,可在植被、水、云等干扰信息的条件下有效提取蚀变异常信息。

自1972年美国发射了首颗陆地卫星(Landsat-1)以来,国内外研究人员利用遥感数据解译围岩蚀变信息开展了大量研究工作。马建文(1997)运用“TM掩膜+主成分变换+分类识别”的方法提取了矿化弱信息;王晓鹏等(2002)利用波段比值和主成分分析方法(principal components analysis, PCA)对西昆仑塔什库尔干地区进行矿物蚀变信息提取;陈涛(2012)、赵静(2016)以及赵芝玲等(2016)利用遥感影像通过不同蚀变提取方法对蚀变信息进行了提取。国外的学者利用遥感技术对矿化蚀变的提取研究比国内更早,Crosta and Moore(1989)首次运用TM影像进行主成分分析对巴西研究区的铁染和泥化蚀变信息进行分析提取;ETM+影像在空间分辨率和光谱分辨率上具有优势,Zeinlabdein et al.(2020)借助ETM+遥感影像数据对苏丹中部科尔多凡州的金矿进行勘探,利用主成分分析法成功提取区域地质解译信息;Wambo et al.(2020)利用Landsat-8数据和ASTER数据探测喀麦隆东部恩古拉科伦米斯地区与金矿化有关的热液蚀变带,采用主成分分析、独立成分分析(Independent Component

Correlation Algorithm, ICA)以及波段比值的方法提取了铁化、泥化蚀变信息,同时在ASTER影像数据中对赤铁矿、高岭石和绿泥石等进行了详细区分。

20世纪60年代美国数学家Mandelbrot(1967)提出分形理论,该理论是现代研究复杂性科学理论的多重分形模型,已被广泛应用于矿产勘探等领域,国内外地质学者将分形理论应用于遥感技术中来提取蚀变异常信息,指导找矿并对其进行了更深入的探究(张廷斌等,2009)。Forouzanand Arfani(2020)利用“密度-面积”(Concentration-Area, C-A)分形理论模型圈定热液蚀变范围并进行密度分割;Shahriari et al.(2013)和 Mehdi et al.(2015)利用C-A分形模型或与吸收带进行结合,对研究区主成分影像进行划分,成功提取热液蚀变信息并分析其蚀变类型,取得了良好的找矿效果;Dayaand Afzal(2015)利用C-A模型和“能谱密度-面积”(Spectrum-Area, S-A)模型的优缺点,对研究区内矿化异常信息进行提取,发现C-A模型的优势在于其简单性和易于计算的实现;成秋明等(2009)利用分形的自相似性和奇异性在多重分形成矿预测中取得了突出成果;赵少杰等(2011)运用分形几何原理对遥感影像线性构造进行了定量分析;余敏等(2014)利用遥感异常的分形特征,采用求和方法有效提取了蚀变信息;赵忠海等(2023)运用分形理论揭示复杂的地质结构,提取蚀变信息并有效排除干扰信息为矿产勘查提供理论依据。

阳山地区矿产资源丰富、种类多样,是广东省比较有潜力的找矿区域之一。近几年来针对该区的找矿研究工作不断增加,傅良刚等(2015)对阳山县石寨银铅锌矿床的控矿条件和成因进行研究分析,

认为该矿床为矽卡型矿床。目前对该地区的勘探手段以物、化探为主,利用磁异常对区内含黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等金属矿物异常信息进行观察分析(骆勇军,2020),但对区大面积分布的围岩蚀变信息提取的研究还相对薄弱。本文以阳山地区为研究区,选用Landsat-5的TM影像,运用基于分形理论改进的主成分分析法对区内铁染和泥化蚀变异常信息进行遥感解译,并对所提取的蚀变信息进行等级划分,为研究区寻找热液型矿床提供数据支撑,同时为其他地区遥感蚀变解译提供技术借鉴。

1 研究区地质概况

阳山县隶属于广东省清远市,位于连江中游,

大地构造上位于华夏地块粤北坳陷内,连阳岩体东北角,郴州—怀集断裂带与阳山—乳源断裂组交汇部位(傅良刚等,2015;南争路等,2019;骆勇军,2020)。区内出露的地层主要有寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系和第四系(图1)。其中,石炭系出露面积最大,由下石炭统石磴子组灰岩、测水组砂岩泥质页岩和梓门桥组灰岩等组成。

区内断层走向主要为北东向、北西向,少量为近南北向。北北东向岩体接触带构造与成矿关系密切,是区内重要的控矿构造。区域内岩浆活动强烈,与碳酸盐类及页岩接触时,产生较为强烈的接触变质作用,地层发生一定程度的变质。区内围岩蚀变较强,发育有硅化、矽卡岩化、绿帘石化、绿泥石化、

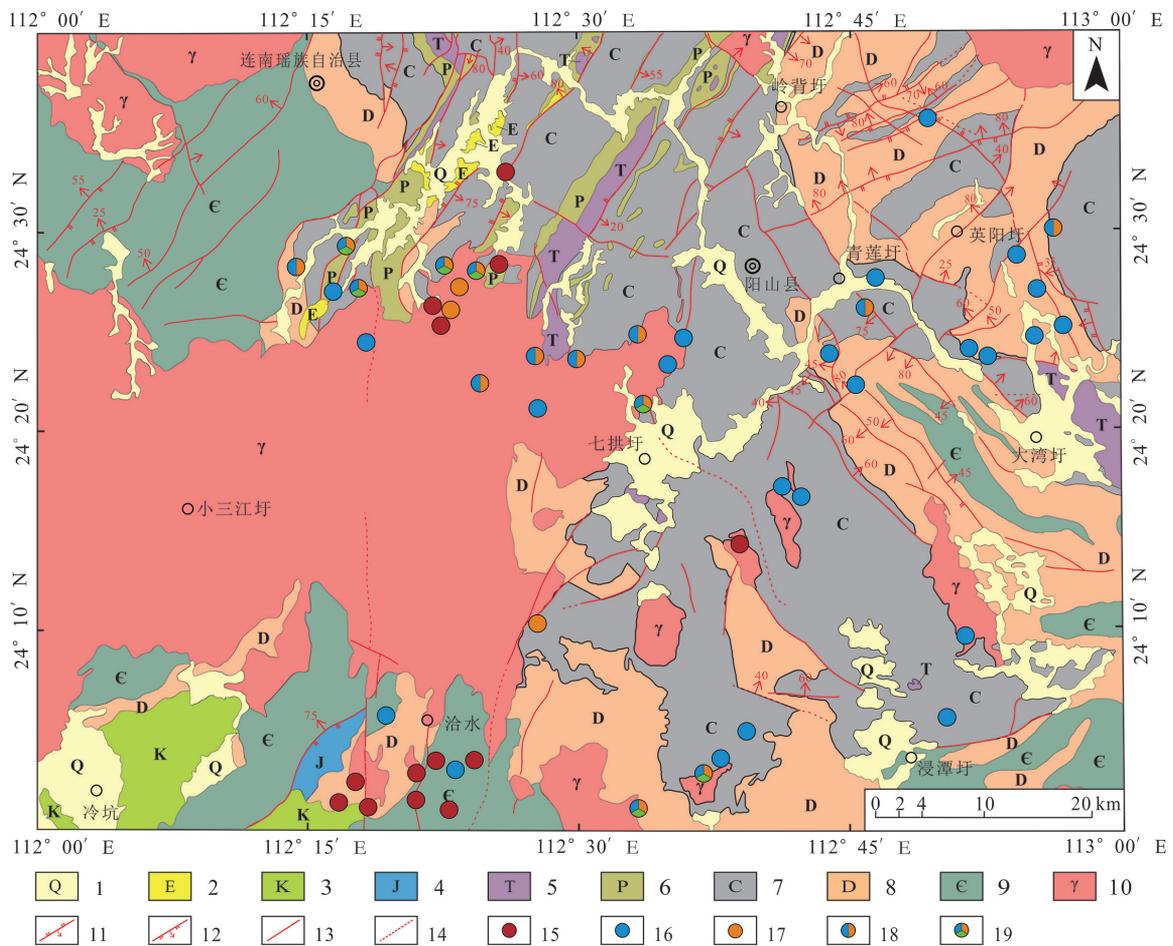


图1 广东阳山地区地质矿产简图

Fig. 1 Geological and mineral resources map of the Yangshan area, Guangdong province

1-第四系粘土、砂、砾;2-古近系砂岩、粉砂岩;3-白垩系砂岩、砾岩;4-侏罗系长石砂岩;5-三叠系泥质页岩夹砂岩和煤层;7-石炭系灰岩、白云岩;8-泥盆系灰岩、白云岩;9-寒武系千枚岩、片岩;10-花岗岩;11-逆断层;12-正断层;13-性质不明断层;14-推断层;15-铁矿点;16-铅矿点;17-锌矿点;18-铅锌矿点;19-多金属矿点

黄铁矿化、磁铁矿化、黄铜矿化等蚀变。区内大面积的燕山期花岗岩与碳酸盐类接触形成矽卡岩带以及大理岩带,大理岩化主要发育于矽卡岩化带外部。矽卡岩化主要发育于花岗岩与下石炭统石磴子组灰岩接触部位,是铅锌多金属矿床形成的有利区域,以接触变质和热液蚀变为主(南争路等,2019),石榴石矽卡岩、石榴石透辉石矽卡岩、透辉石矽卡岩等是良好的找矿标志。

2 蚀变提取流程与研究方法

2.1 蚀变提取流程

本文以阳山县TM遥感影像为基础,利用主成分分析法提取蚀变矿物相应信息。对图像辐射校正、大气校正、裁剪等预处理后,计算出反映研究区蚀变异常的主成分,并分析灰度像元值和异常主成分的个数(余敏等,2014)。利用分形理论求和的方法对蚀变异常信息进行统计分析,得到了遥感蚀变的分形特征,与门限方法进行异常分级比较,并结合区域地质背景、已知矿点等相关资料进行对比分析。遥感蚀变提取流程如图2所示。

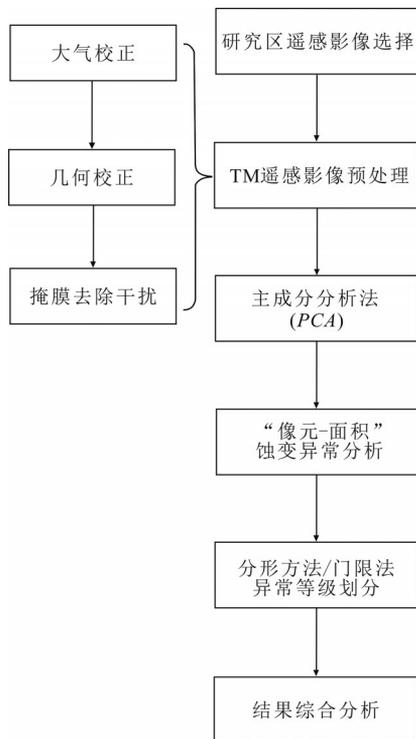


图2 数据处理流程图

Fig. 2 Data processing flowchart

2.2 主成分分析法

主成分分析法是一种研究多个变量之间相关性的多元统计方法,通过一些主成分揭示多个变量之间的内部结构。该方法处理遥感图像主要是利用蚀变矿物的光谱特征,选择不同的波段进行主成分变换分析,通过正交线性变换来减少分类时影像各波段间的相关性,减少信息冗余和数据间的相关性(赵忠海等,2023)。在转换过程中,特征值的大小反映了相关主成分的信息量,从而完成了对遥感影像中矿化蚀变异常信息的提取(范玉海等,2018)。主成分分析法用于识别研究区铁染、泥化等蚀变异常,通过正交变换使每个主成分代表不同的地质信息,转换后的主成分打破了数据间的相关性。

2.3 分形方法

由于成矿过程与热液活动相关,经多次成矿作用,已矿化的部分将会再次发生矿化现象(李程,2021)。因此,不同时期的成矿过程会呈现出独特的自相似性,使得矿化过程呈现空间的多重分形特征,因此适用分形理论对其研究。对矿化蚀变阈值使用分形模型进行划定范围时通常用求和法、面积法和距离法等,从不同角度定义的求和法的应用主要有“像元-面积”、“能谱密度-面积”等分形方法(余敏等,2014),本文采用求和法中的“像元-面积”分形方法来划定异常值,并与门限方法进行对比。

“像元-面积”分形方法的一般表达式为:

$$N(t) = Ct^{-\gamma} \quad (1)$$

其中比例系数 $C > 0$, 分形维数 $\gamma > 0$, t 为特征尺度, $N(t)$ 表示大于等于 t 值的总数。设图像的像元值为 $\{X_i\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$ 时:

$$N(t) = \sum_{i=1}^N X_i \quad (2)$$

其中 $X_i \geq t$, $\min X_i \leq t \leq \max X_i$, 对公式两边取对数得到:

$$\ln N(t) = -\gamma \ln t + \ln c \quad (3)$$

$\ln N(t)$ 与 $\ln t$ 成线性相关,使用最小二乘法进行拟合,将相关像元数据代入对数的分形模型中,得出斜率 $-\gamma$ 和拟合度 R^2 ,并对不同的蚀变信息分级处理。蚀变的异常值和背景值所对应的斜率不同,线段的分界值可以作为临界值来区分不同等级的蚀变异常和背景(成秋明等,2009)。通常,具有自

相似性蚀变信息的分形特征 $\ln N(t)$ 与 $\ln t$ 所呈现的线性关系可以拟合成一条直线。

3 数据预处理

研究区植被茂盛,覆盖面积较大,为减少干扰,本文选用2012年12月7日获取的Landset-5遥感影像数据作为研究区蚀变解译的数据源。在影像中,矿化蚀变信息属于弱信息,并且除蚀变信息之外还存在大量的背景信息和地物信息,这些信息对提取蚀变信息有较大的影响(吴畅宇等,2023)。因此,在从影像数据中提取蚀变信息之前,需要对影像进行辐射校正、大气校正和归一化处理,以突出地物之间的差异(胡滨,2020)。为了消除遥感影像上的不一致性和失真性,利用ENVI软件通过辐射校正将图像的亮度值从相对数值转换为具有物理意义的绝对辐射亮度值,再通过FLAASH模块进行大气校正,抵消大气散射、吸收和反射引起的辐射误差(赵忠海等,2023)。

为了更有效、准确地提取蚀变信息,还需要去除植被、阴影、水体等信息的干扰来创建掩膜图像。研究区内植被发育较好,使用归一化植被指数(NDVI)模型提取研究区的植被信息,并创建掩膜图像以消除干扰。通过波段比值法增强阴影和水体信息,运用公式 $TM1/TM7 > 0.6$ 对阴影部分进行去除,并通过 $TM2/TM5 > 0.75$ 公式对水体建立掩膜去除干扰信息。

4 蚀变异常信息提取

本次研究选取主成分分析法来识别研究区的蚀变异常信息,在对遥感蚀变信息进行分级后,结合已知的地质资料进行全面分析,以便对潜在的成矿区域进行有效预测。通过添加已知矿点和与研究区进行重砂与金属量取样勘验后,与所划定的重砂分散晕以及金属量分散晕等地球化学异常信息相结合进行对比,以此来进一步的验证。

4.1 铁染蚀变异常信息提取

根据研究区围岩蚀变的类型以及蚀变矿物的波谱曲线特征,选取预处理后的1、3、4、5四个波段进行主成分分析提取研究区铁染蚀变异常信息(张

船红和何政伟,2013),铁染蚀变异常各主成分特征向量见表1。

表1 PCA(1,3,4,5)特征向量表

Table 1 PCA(1,3,4,5) feature vector table

主成分	TM1	TM3	TM4	TM5
PC1	0.1063	0.2868	0.4756	0.8248
PC2	0.5454	0.4207	0.5129	-0.5124
PC3	-0.6022	-0.3264	0.6974	-0.2110
PC4	-0.5732	0.7964	-0.1564	-0.1129

为防止羟基和碳酸根干扰,异常主分量TM3与TM4应符号相反,以提取与铁染异常相关信息。从表1中可以看出,主成分PC4的TM3符号系数与TM1和TM4符号系数相反,TM3符号系数与TM5符号系数相同,且TM波段主要为植被、地形、地貌信息。根据上述原理经过主成分变换,选择变换后的特征向量PC4为铁染异常的主成分影像(图3),亮色调部分代表铁染蚀变异常信息。提取铁染蚀变信息,运用分形求和法选取两条线段部分进行蚀变阈值划分(余敏等,2014)。选取PC4主成分进行铁染异常信息提取,采用求和法计算出铁染异常主成分影像的灰度频数(表2)。

根据表2中的数据创建对数图,并通过最小二乘法对离散点进行线性拟合。这些离散数据拟合在两条直线中,两条线的不同斜率由铁染蚀变的异常值和背景值的分形特征不同所导致(Asl et al., 2015)。以不同线段的转折点为临界点,对应的灰度值作为临界值,由图4a可知两条直线的拟合度分别为0.8177和0.9454,表明 $\ln t$ 和 $\ln N(t)$ 有相关性,研究区铁染蚀变异常及背景区的灰度信息都具有分形特征。

进一步对铁染蚀变异常和背景区进行分级,对整体数据进行分级后发现y1部分的低值蚀变提取效果较差。因此,将y1作为背景值,选择y2部分的数据并将其拟合为三条线段(图4b)。对应的分维值D分别为2.4834、4.0965和7.1855,从图中可得到三条线段临界点的灰度值,将其作为一级、二级、三级异常划分的分界点,对研究区影像进行密度分割(图5)。

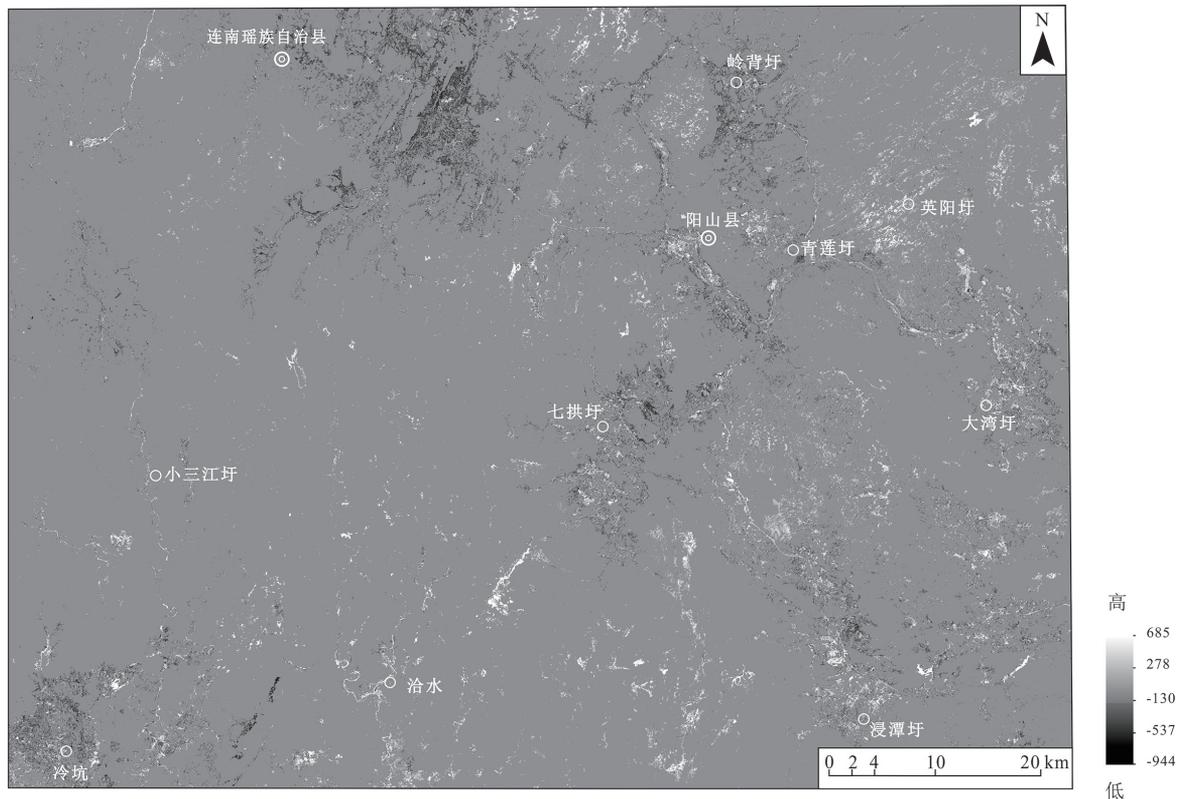


图3 研究区铁染蚀变PC4影像图

Fig. 3 PC4 image of iron staining and alteration in the study area

表2 PC4波段灰度数据略表

Table 2 Outline of PC4 band grayscale data

t	$\ln t$	$N(t)$	$\ln N(t)$
2.1904	0.7841	49442	10.8086
8.6266	2.1549	47623	10.7711
15.0628	2.7122	45495	10.7253
21.4990	3.0680	43136	10.6721
27.9353	3.3299	40222	10.6022
.....
105.1698	4.6556	9492	9.1582
111.6060	4.7150	8253	9.0183
118.0422	4.7710	7051	8.8610
124.4784	4.8241	6042	8.7065
130.9146	4.8745	5152	8.5471
137.3508	4.9225	4499	8.4116
.....
311.1285	5.7402	179	5.1874
317.5647	5.7607	151	5.0173
324.0009	5.7807	154	5.0370
330.4371	5.8004	135	4.9053
336.8733	5.8197	127	4.8442
.....

4.2 泥化蚀变异常信息提取

由于含羟基类矿物在TM5波段呈现高反射光谱特征,在TM7波段有强烈吸收特征,选取预处理后的1、4、5、7四个波段组合进行主成分分析,对主成分转换后特征向量(表3)分析可知泥化蚀变异常信息主要集中在PC4中。PC4中波段1和波段5的符号与波段4和波段7相反,为避免铁氧化物矿物受可见光波段的影响(陈超民等,2020),没有选择2、3波段。

由表3可知,选取特征向量PC4作为泥化异常的主成分,其中亮色调部分代表泥化异常信息(图6)。同样采用分形求和法对提取的泥化异常信息进行等级划分,对所选取的PC4主成分进行泥化异常信息提取,具体数据见表4,表中 t 值为PC4波段的亮度DN值。

将表4中的数据生成对数图,运用最小二乘法对离散点进行线性拟合。将这些离散数据拟合成两条直线,其所对应的灰度值作为临界值(图7)。由图7a可知两条直线的拟合度分别为0.8947和0.9689,这表明泥化的对数数据具有相关性,且研

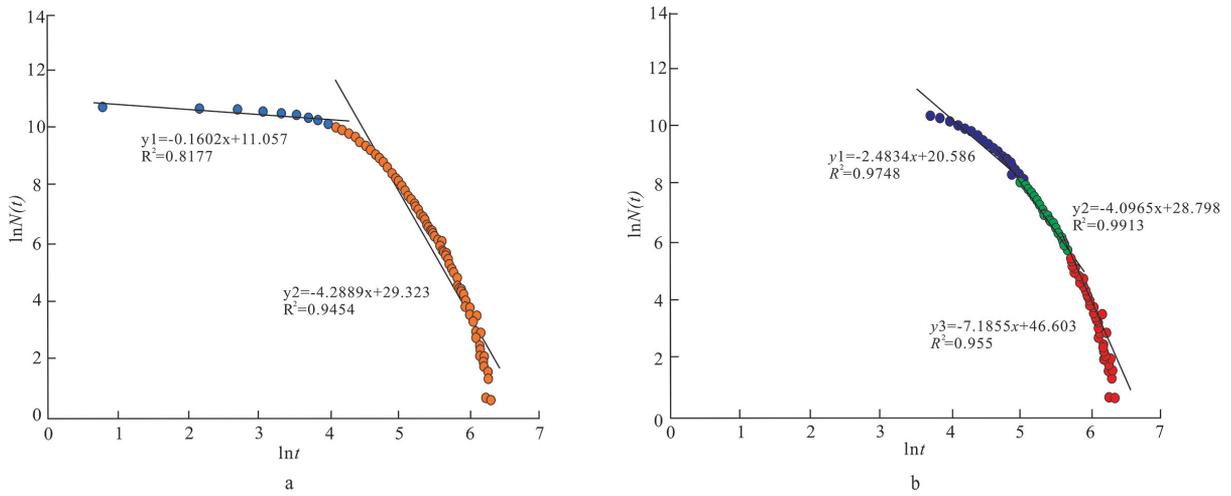


图4 铁染蚀变异异常灰度值 $\ln N(t)$ - $\ln t$ 图

Fig. 4 Iron staining alteration abnormal grayscale value $\ln N(t)$ - $\ln t$ plot
a.PC4波段灰度值 $\ln N(t)$ - $\ln t$ 图; b.铁染异常灰度值 $\ln N(t)$ - $\ln t$ 图

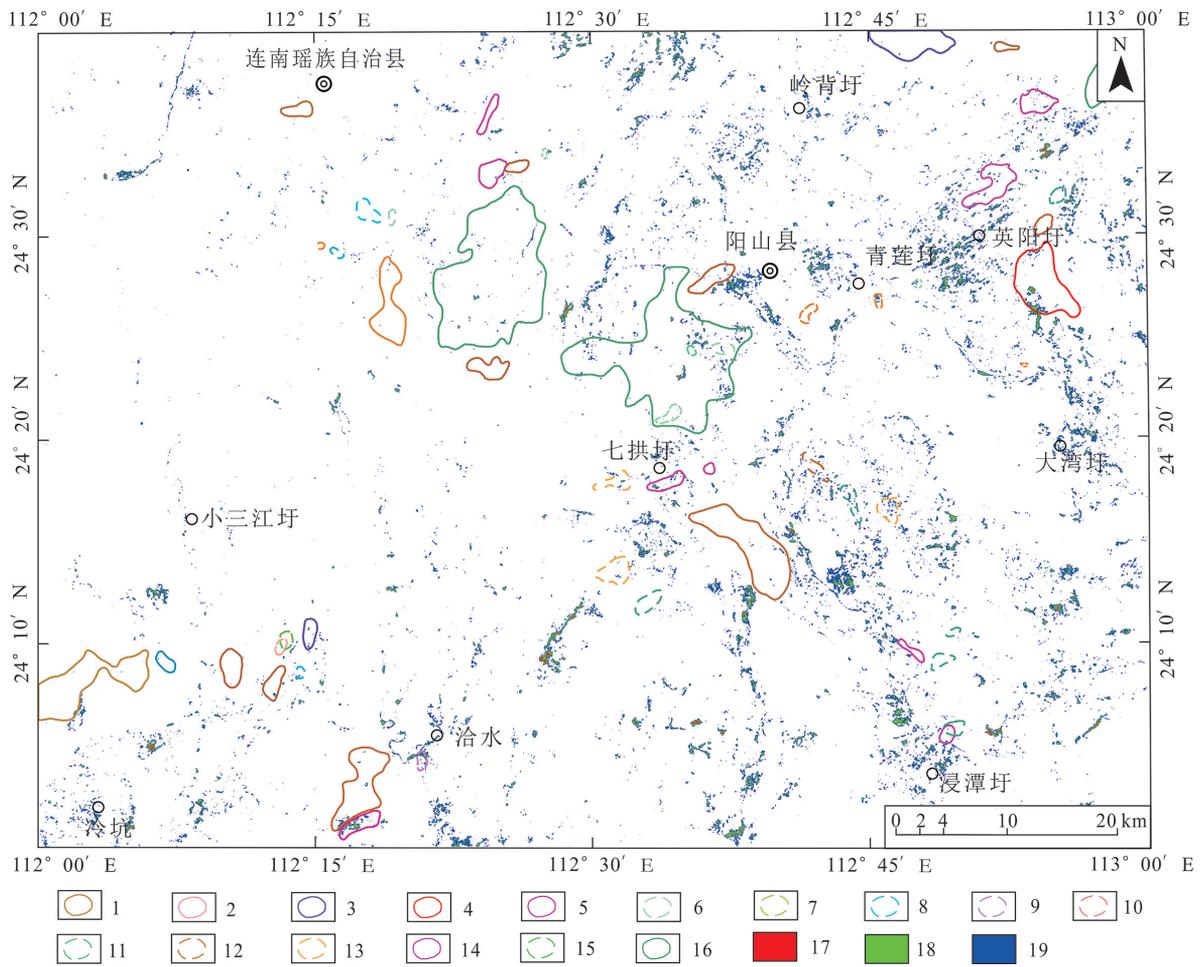


图5 研究区铁染蚀变异异常分级图

Fig. 5 Classification map of iron staining and alteration anomalies in the study area

1-Sn重砂分散晕; 2-W重砂分散晕; 3-W、Sn重砂分散晕; 4-Sn、Pb重砂分散晕; 5-Hg重砂分散晕; 6-Pb金属分散晕; 7-Zn金属分散晕; 8-Pb、Zn、Cu金属分散晕; 9-Bi金属分散晕; 10-Cu金属分散晕; 11-W金属分散晕; 12-Pb、Zn金属分散晕; 13-Cr金属分散晕; 14-Nb-Ta重砂分散晕; 15-Sn金属分散晕; 16-W、Sn、Bi重砂分散晕; 17-一级异常; 18-二级异常; 19-三级异常

表3 PCA(1,4,5,7)特征向量表
Table 3 PCA(1, 4, 5, 7) eigenvector table

主成分	TM1	TM4	TM5	TM7
PC1	0.0527	0.3573	0.7142	0.5995
PC2	0.4988	0.7418	-0.0327	-0.4470
PC3	0.7511	-0.2183	-0.3681	0.5027
PC4	0.4293	-0.5238	0.5944	-0.4337

究区泥化异常及背景区的灰度信息有分形特征。通过对泥化蚀变异常和背景区进行分级,将其拟合成三条线段(图7b)。同样将三条线段临界点的灰度值作为一级、二级、三级异常划分的临界值,对遥感影像进行密度分割(图8)。

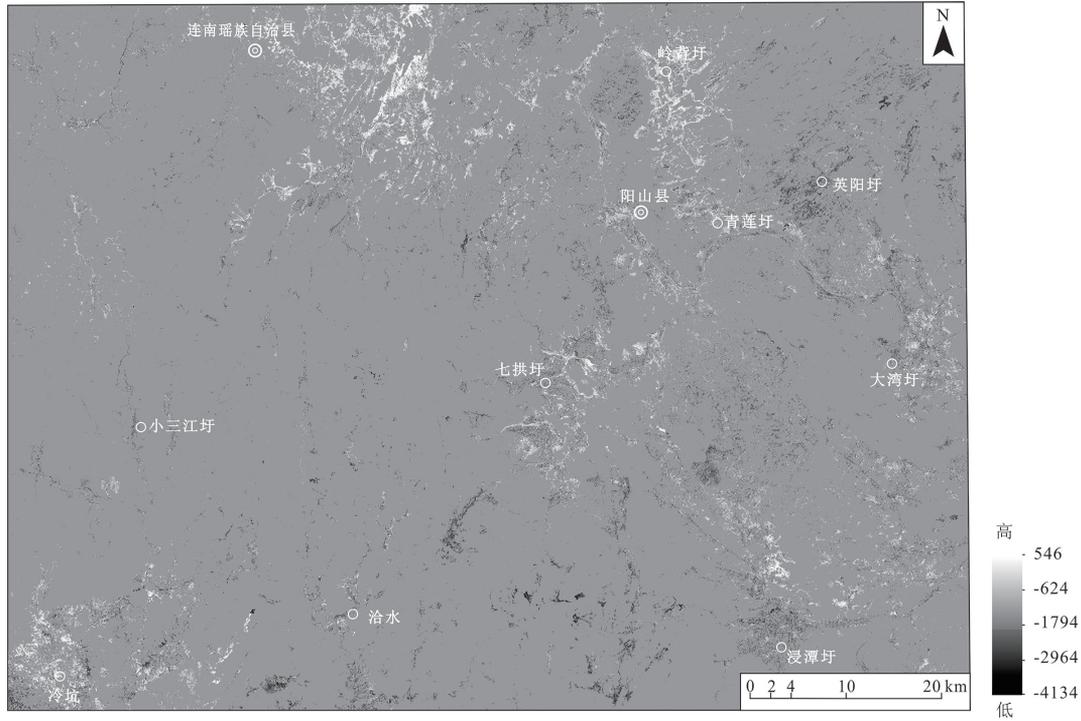


图6 研究区泥化蚀变PC4影像图

Fig. 6 PC4 image of mudification and alteration in the research area

表4 PC4波段灰度数据略表

Table 4 Outline of PC4 band grayscale data

t	$\ln t$	$N(t)$	$\ln N(t)$
10.4154	2.3433	132658	11.7955
28.9989	3.3673	116100	11.6622
47.5824	3.8625	93748	11.4484
66.1658	4.1922	70257	11.1599
.....
196.2500	5.2794	1728	7.4547
214.8335	5.3699	868	6.7662
233.4170	5.4528	398	5.9865
252.0004	5.5294	176	5.1705
270.5839	5.6006	81	4.3944
.....
400.6681	5.9931	5	1.6094
419.2516	6.0384	3	1.0986
437.8350	6.0818	11	2.3979
456.4185	6.1234	4	1.3863
475.0020	6.1633	2	0.6931
.....

5 门限法与分形方法异常分级对比分析

门限法主要是利用统计学原理对符合正态分布的蚀变信息进行密度分割,提取蚀变异常的同时还可以进行异常级别划分(李文超, 2023)。门限法根据异常等级计算出研究区的异常区域并进行分级,根据遥感图像各主成分特征向量统计分析可知研究区铁染、泥化异常信息主要在PC4中。

5.1 门限法与分形方法圈定异常信息量对比

运用分形方法将表中数据生成双对数图像(图4、图7),图中蚀变异常区和背景区相对应的拟合度表明研究区的蚀变信息具有多重分形的结构特征,并进一步统计分析以及分形得到蚀变异常图

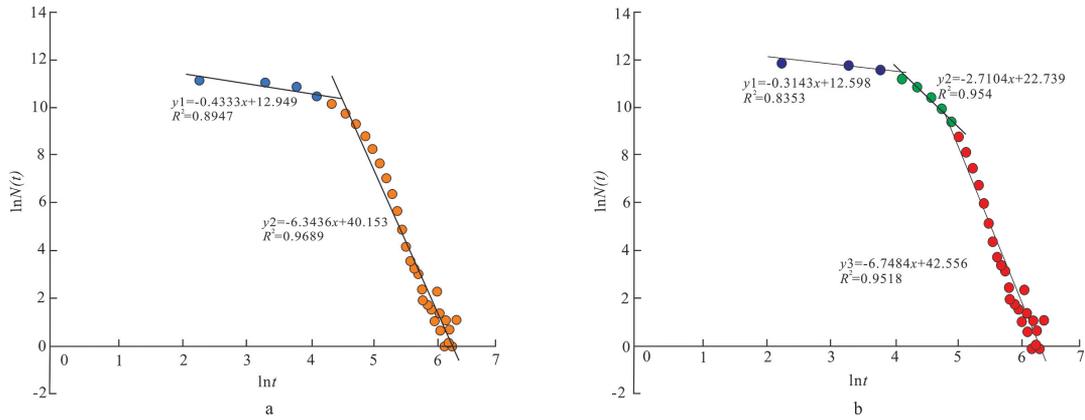


图7 PC4波段灰度值 $\ln N(t)$ - $\ln t$ 图

Fig. 7 PC4 band grayscale value $\ln N(t)$ - $\ln t$ plot

a.PC4波段灰度值 $\ln N(t)$ - $\ln t$ 图; b.泥化异常灰度值 $\ln N(t)$ - $\ln t$ 图

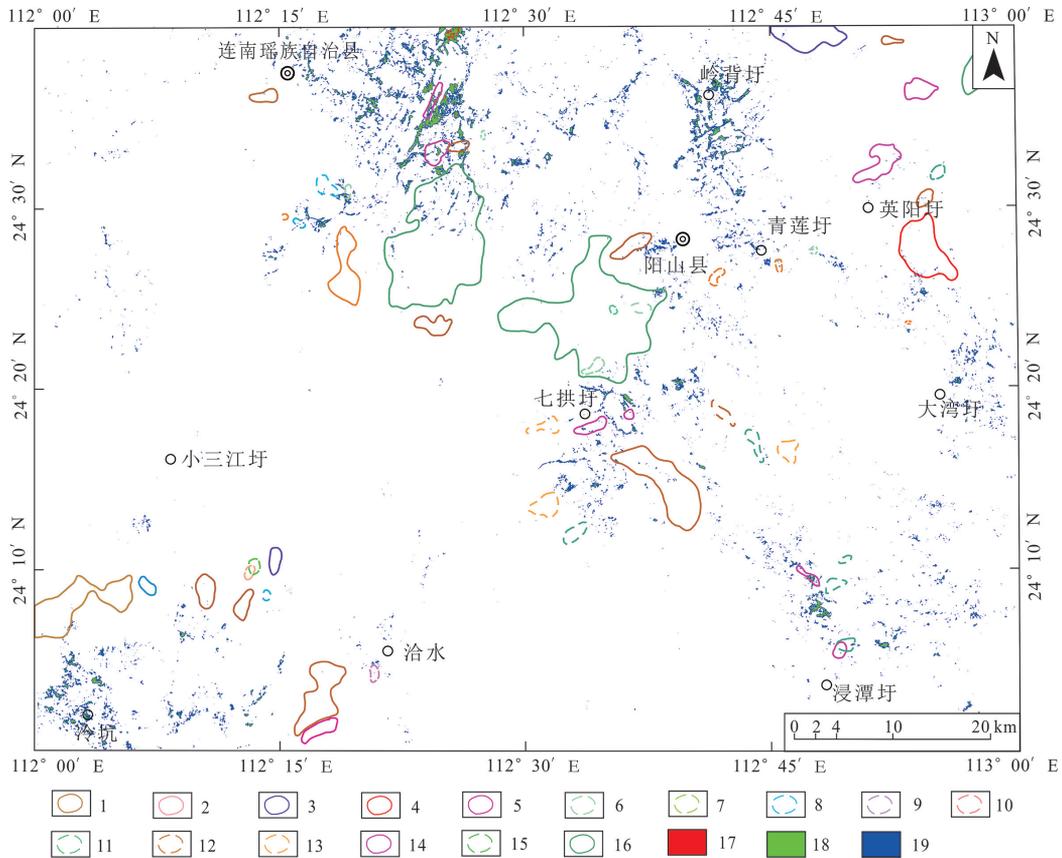


图8 研究区泥化蚀变异异常分级图

Fig. 8 Classification map of abnormal mudification and alteration in the research area

1-Sn重砂分散晕;2-W重砂分散晕;3-W、Sn重砂分散晕;4-Sn、Pb重砂分散晕;5-Hg重砂分散晕;6-Pb金属分散晕;7-Zn金属分散晕;8-Pb、Zn、Cu金属分散晕;9-Bi金属分散晕;10-Cu金属分散晕;11-W金属分散晕;12-Pb、Zn金属分散晕;13-Cr金属分散晕;14-Nb-Ta重砂分散晕;15-Sn金属分散晕;16-W、Sn、Bi重砂分散晕;17-一级异常;18-二级异常;19-三级异常

(图5、图8),根据图中的各个线段交点算出临界点的DN值(表5)。对分析后的蚀变影像进行均值滤波去除孤立的点,再对这些临界点进行密度分割并

赋予不同的颜色从而生成蚀变分级图。运用分形方法圈定的二级铁染以及泥化蚀变异异常信息,在图7中拟合直线的拟合度高达0.9689和0.954。从表5

中可以看出分形方法圈定的铁染以及泥化的二级异常 99.9746%、99.4708%~99.9602%,这其中包含了门限法计算出的铁染和泥化一级异常。

表5 门限法与分形方法异常划分值对比表

异常值划分方法	铁染		泥化		像元值比例(%)	
	异常等级	DN临界值	异常等级	DN临界值	铁染	泥化
分形方法	三级异常	53.6801	三级异常	10.4154	97.7054	97.9244
	二级异常	175.9681	二级异常	66.1658	99.8180	99.6099
	一级异常	291.8199	一级异常	159.0831	99.9746	99.9602
门限法	三级异常	38.9600	三级异常	58.4781	96.8949	97.8715
	二级异常	51.9467	二级异常	73.0977	99.1631	99.4708
	一级异常	64.9333	一级异常	87.7172	99.8730	99.9329

5.2 门限法与分形方法异常等级影像对比

将PC4铁染、泥化异常主成分门限法分级的结果进行对比,并与前人研究资料中所获取的该研究区域内重砂分散晕和金属量分散晕相结合做进一步验证。本区重矿物的分布主要与燕山期花岗岩有关,从图9中可以看出冷坑-冷水地区的Sn、Hg、Nb-Ta重砂异常和Sn、Pb重砂异常在经过主成分分析后异常范围更大,泥化蚀变解译中连南瑶族自治县地区的Hg重砂异常在分形解译后面积增大(图10),且区内英阳圩地区的Sn金属异常和Pb、Zn、Cu金属异常通过C-A模型分级处理后更为

明显(图9),推断这些区域是寻找金属矿床的有利部位。蚀变异常信息的分级方法中,C-A分级方法与门限法不同之处在于,C-A分级方法要对空间的变化和元素含量的分布频率加以考虑,还要对影像中蚀变异常的空间分布形态、标度不变性以及自相似性等进行分析,使地质意义相似的蚀变信息归到同一异常级别中,而不是仅仅基于亮度值的高低进行简单划分。

利用分级法与门限法分别对研究区进行矿物蚀变异常值提取,发现在研究区北部和东北部蚀变分布较为集中,呈大面积分布,而南部和西部则表

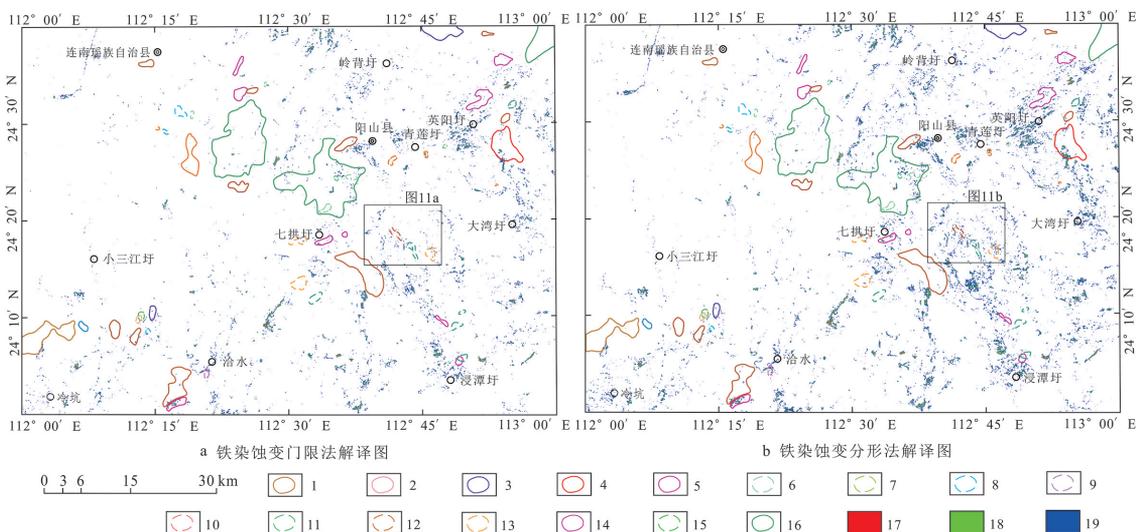


图9 研究区铁染蚀变门限法与分形方法解译对比图

Fig. 9 Comparison diagram of iron staining and alteration threshold method and fractal method interpretation in the research area
 1-Sn重砂分散晕;2-W重砂分散晕;3-W、Sn重砂分散晕;4-Sn、Pb重砂分散晕;5-Hg重砂分散晕;6-Pb金属分散晕;7-Zn金属分散晕;8-Pb、Zn、Cu金属分散晕;9-Bi金属分散晕;10-Cu金属分散晕;11-W金属分散晕;12-Pb、Zn金属分散晕;13-Cr金属分散晕;14-Nb-Ta重砂分散晕;15-Sn金属分散晕;16-W、Sn、Bi重砂分散晕;17-一级异常;18-二级异常;19-三级异常

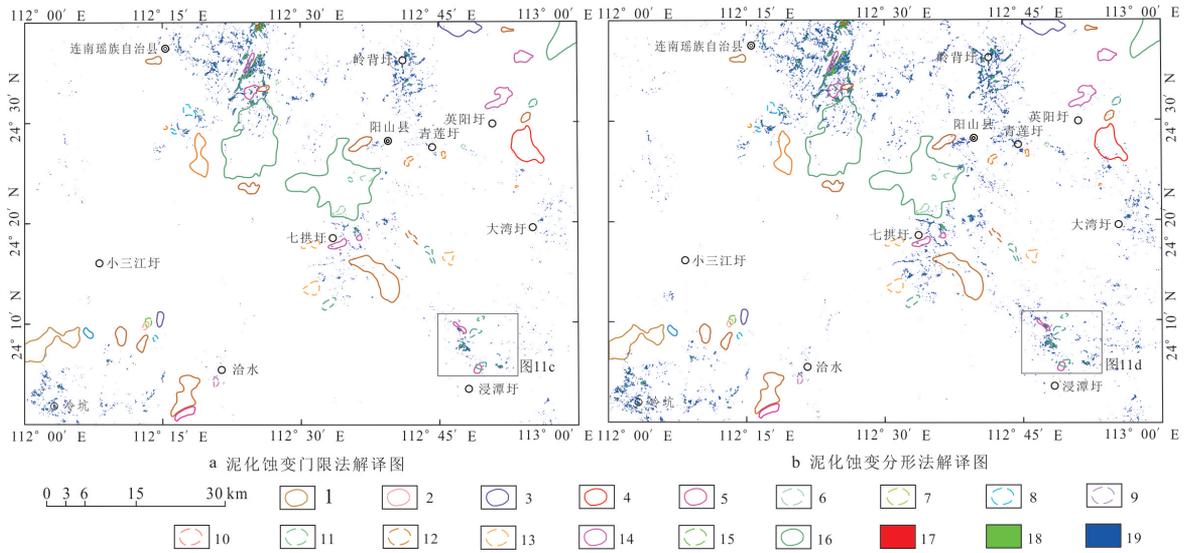


图10 研究区泥化蚀变门限法与分形方法解译对比图

Fig. 10 Comparison between the threshold method and fractal method for interpretation of mud erosion in the research area
 1-Sn重砂分散晕;2-W重砂分散晕;3-W、Sn重砂分散晕;4-Sn、Pb重砂分散晕;5-Hg重砂分散晕;6-Pb金属分散晕;7-Zn金属分散晕;8-Pb、Zn、Cu金属分散晕;9-Bi金属分散晕;10-Cu金属分散晕;11-W金属分散晕;12-Pb、Zn金属分散晕;13-Cr金属分散晕;14-Nb-Ta重砂分散晕;15-Sn金属分散晕;16-W、Sn、Bi重砂分散晕;17-一级异常;18-二级异常;19-三级异常

现为低值异常。如图11所示,选取研究区局部区域,叠加矿点等相关信息,发现C-A分级方法圈定

的铁染、泥化异常范围更大,且门限法圈定的三种等级蚀变异常基本包含在C-A分级方法圈定的异

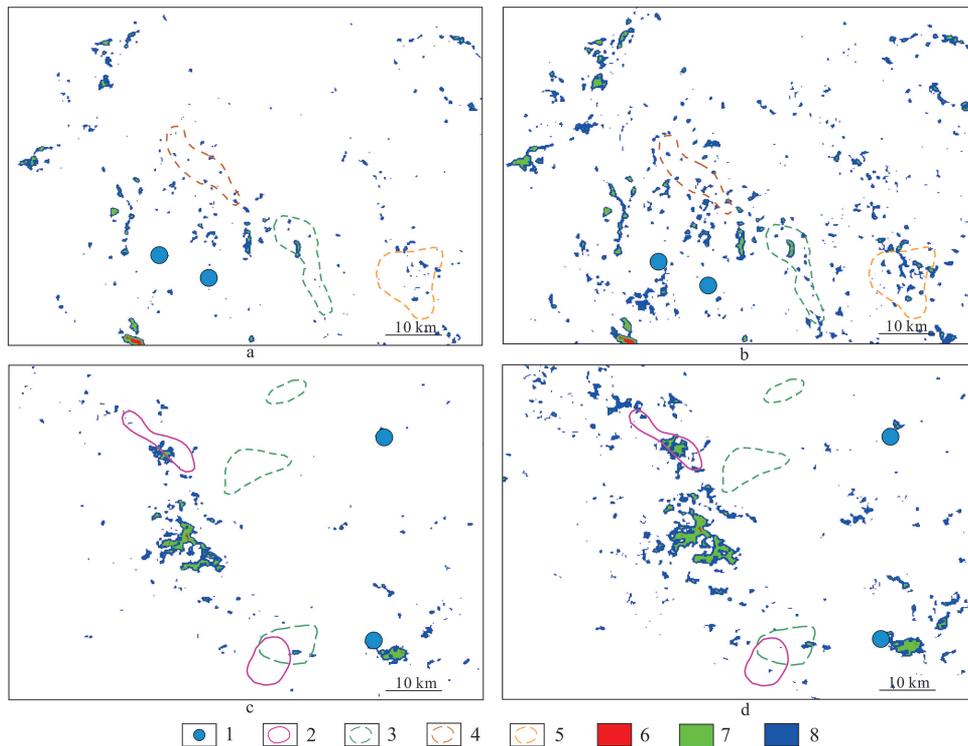


图11 研究区局部门限法与分形方法解译对比图

Fig. 11 Comparison diagram of interpretation between departmental limit method and fractal method in the research area
 a.铁染蚀变门限法局部图; b.铁染蚀变分形方法局部图; c.泥化蚀变门限法局部图; d.泥化蚀变分形方法局部图
 1-铅矿点;2-Hg重砂分散晕;3-Zn金属分散晕;4-Pb、Zn金属分散晕;5-Cr金属分散晕;6-一级异常;7-二级异常;8-三级异常

常内。门限法对该部分区域分级异常信息显示较弱,而通过分形方法分级后该区域异常信息均得到了增强。利用分形方法进行异常分级,比门限法划分更为细致,异常信息增多,因此分形方法在该研究提取蚀变异常信息临界值中更具优越性。

6 结论

本文以矿产资源丰富的广东省阳山县为研究区,选用 Landsat-5 的 TM 影像,运用主成分分析法对区内铁染和泥化蚀变异常信息进行遥感解译,并对所提取的蚀变信息进行等级划分。通过门限法和分形方法两种划分方法对研究区的蚀变异常进行对比,最后根据研究区蚀变异常信息的分形特征,利用求和方法对研究区的铁染和泥化蚀变异常信息进行分级,得出以下结论:

(1)研究区蚀变信息符合分形理论,具有铁染和泥化异常的蚀变信息拟合直线的拟合度较高的特征,并具有良好的自相似性。研究区泥化蚀变与铁染蚀变主要分布于北东部及北部区域,其它区域小面积离散分布,与目前勘探结果基本一致。由于 C-A 模型在高背景值中能够有效地检测到相应的异常信息,而弱异常值通常在低背景值中很难被提取,导致部分异常信息没有很好的显现出来。在研究区北部泥化异常蚀变信息提取中发现部分异常并未在已知勘探资料中显示,后续可以进行进一步勘验。

(2)利用分形模型统计出的分维值与研究区的蚀变信息密集区基本一致,且蚀变信息的分维值可以对蚀变等级进行准确划定,而门限法是基于突变点选择阈值进行等级划分,往往在提取蚀变异常的结果中会包含大量的背景信息成分,因此圈定的蚀变异常等级区域准确性欠佳。相对于门限法,在遥感蚀变信息提取中分形方法加强了阈值选取的准确度,可为矿产勘查工作提供更好的技术支持。

参考文献:

陈超民,冷成彪,司国辉.2020.基于 GIS 与层次分析法的综合成矿预测——以新疆库米什地区为例[J].黄金科学技术,28(2):213-227.

成秋明,张生元,左仁广,陈志军,谢淑云,夏庆霖,徐德义,姚凌青.2009.多重分形滤波方法和地球化学信息提取技术研究进展[J].地学前缘,16(2):185-198.

陈涛.2012.基于 TM 数据的某矿区遥感矿化蚀变信息提取研究[J].皖西学院学报,28(2):125-128.

傅良刚,南争路,洗源宏.2015.广东阳山县矽卡岩型银铅锌矿床控矿条件与成因分析[J].黄金,36(9):19-23.

范玉海,王辉,杨兴科,彭齐鸣,秦绪文,杨金中,张少鹏,谭富荣.2018.基于高分辨率遥感数据的稀有金属矿化带勘查[J].国土资源遥感,30(1):128-134.

胡滨.2020.基于多源遥感数据的西藏多龙地区热液蚀变矿物提取方法研究[D].中国地质大学博士学位论文.

李程.2021.深部地质地球化学三维定量矿产预测方法研究[D].成都理工大学博士学位论文.

李文超.2023.云南普朗铜矿遥感构造解译及蚀变信息精细化提取[D].昆明理工大学硕士学位论文.

骆勇军.2020.广东省阳山县深坑矿区石寨矿点成矿潜力分析[J].甘肃冶金,42(4):105-108.

马建文.1997.利用 TM 数据快速提取含矿蚀变带方法研究[J].遥感学报,1(3):208-213+244.

南争路,梁金龙,毛世东,洗源宏.2019.广东阳山县铅锌多金属矿地质特征及元素赋存状态[J].东华理工大学学报(自然科学版),42(1):37-44.

吴畅宇,代晶晶,陈伟,江彪,王登红,王成良,王文君,孙洪章,王强,陈玮,蒲秀浪,马文文.2023.内蒙古苏莫查干敖包萤石矿区遥感蚀变信息提取及其找矿指示意义[J].矿床地质,42(4):845-858.

王晓鹏,谢志清,伍跃中.2002.ETM 图像数据中矿化蚀变信息的提取——以西昆仑塔什库尔干地区为例[J].地质与资源,11(2):119-122.

吴志春,郭福生,李华亮,许欢,张树明,黎广荣,张万良,祝民强.2020.主成分分析法在相山火山盆地蚀变分带解译中的应用[J].大地构造与成矿学,44(3):385-403.

余敏,温兴平,徐俊龙,晁江琴,杨炀,王军,易邦进.2014.基于分形的遥感蚀变异常提取在毛坪铅锌矿中的应用[J].遥感技术与应用,29(5):853-860.

张船红,何政伟.2013.基 ETM+ 和 ASTER 数据的矿化蚀变信息提取[J].地理空间信息,11(4):64-66+187.

赵静,苏程,王习之,黄智才,章孝灿.2016.西澳大利亚伊尔加恩金矿遥感找矿模型[J].遥感信息,31(1):69-76.

赵少杰,钱建平,陈宏毅.2011.遥感线性构造分形统计和蚀变信息提取在桂东地区金铅锌锡多金属成矿预测中的应用[J].大地构造与成矿学,35(3):364-371.

张廷斌,唐菊兴,黄丁发.2009.矿化蚀变信息提取的 TM/

- ETM+遥感影像模式[J].遥感信息,(2):47-51.
- 赵忠海,陈俊,乔锴,崔晓梦,梁杉杉,李成禄.2023.基于分形理论的遥感蚀变信息和构造分析研究—以黑龙江多宝山地区为例[J].现代地质,37(1):153-163.
- 赵芝玲,王萍,荆林海,孙彦峰.2016.用ASTER数据提取植被覆盖区遥感铁矿化蚀变信息[J].金属矿山,(10):109-115.
- Asl R A, Afzal P, Adib A, Yasrebi A B.2015.Application of multifractal modeling for the identification of alteration zones and major faults based on ETM+ multispectral data[J]. Arabian Journal of Geosciences, 8(5):9517-9530.
- Crosta A P, Moore J M. 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A prospecting case history in Greenstone belt terrain[A].//Proceedings of the Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology: 1173-1187.
- Daya A A, Afzal P. 2015. A comparative study of concentration-area (C-A) and spectrum-area (S-A) fractal models for separating geochemical anomalies in Shorabhaji region, NW Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences, 8(10): 8263-8275.
- Forouzan M, Arfania R.2020.Integration of the bands of ASTER, OLI, MSI remote sensing sensors for detection of hydrothermal alterations in southwestern area of the Ardistan, Isfahan Province, Central Iran[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences,23(2): 145-157.
- Mandelbrot B B . 1967. How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension[J]. Science, 156(3775): 636-638.
- Mehdi M, Mehdi H, Amir S. 2015. Integration of concentration-area fractal model and relative absorption band depth method for mapping hydrothermal alterations using ASTER data [J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 7(10):13878-13894.
- Shahriari H, Ranjbar H, Honarmand M. 2013. Image Segmentation for Hydrothermal Alteration Mapping Using PCA and Concentration-Area Fractal Model[J]. Natural Resources Research, 22(3):191-206.
- Wambo J D T, Pour A B, Ganno S, Asimow P D, Zoheir B, Salles R D R, Nzenti J P, Pradhan B, Muslim A M. 2020. Identifying high potential zones of gold mineralization in a sub-tropical region using Landsat-8 and ASTER remote sensing data: A case study of the Ngoura-Colomines goldfield, eastern Cameroon[J]. Ore Geology Reviews, 122:103530.
- Zeinelabdein K A E, El-Nadi A H H, Babiker I S. 2020. Prospecting for gold mineralization with the use of remote sensing and GIS technology in North Kordofan State, central Sudan [J]. Scientific African, 10:e00627.