

崔中良, 周家喜, 罗开. 赣南兴国—宁都萤石成矿带分形结构及成矿与找矿前景. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 108–124. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220186.

Cui Zhongliang, Zhou Jiayi, Luo Kai. Fractal Structure and Application Prospect of Xingguo – Ningdu Fluorite Metallogenic Belt in Southern Jiangxi, China. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 54(1): 108–124. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220186.

赣南兴国—宁都萤石成矿带分形结构及 成矿与找矿前景

崔中良¹, 周家喜^{2, 3}, 罗开^{2, 3}

1. 江西应用科技学院光华宝石与艺术设计学院, 南昌 330100

2. 云南大学地球科学学院, 昆明 650500

3. 云南省高校关键矿产成矿学重点实验室, 昆明 650500

摘要: 萤石是一种重要的非金属战略性关键矿产资源, 其成矿规律及找矿预测广受矿床学界关注。赣南兴国—宁都萤石成矿带地处 NE 向武夷山成矿带与 EW 向南岭成矿带交汇复合部位, 发育一系列萤石矿床。虽然前人对该区萤石矿床进行过较为系统的研究, 认为其主要受断裂构造控制, 但区内断裂构造和萤石矿床空间分布的定量表征及两者之间的耦合关系鲜有报道。本文基于分形理论刻画赣南兴国—宁都成矿带断裂构造和萤石矿床之间的分形结构特征, 并探讨重点成矿与找矿区域。结果显示: 研究区 NE–NNE 向断裂容量维、信息维和关联维分别为 1.609 0、1.608 9、1.594 7, 说明本区成矿地质条件优越, NE–NNE 向断裂与研究区萤石成矿关系密切。萤石矿床容量维、信息维、关联维分别为 0.937 9、0.921 5、0.926 2, 含统计中心矿床时, 萤石矿床数量分形分维值为 0.784 1, 密度分形分维值为 0.784; 未含统计中心矿床时, 萤石矿床数量分形分维值为 1.129 6, 密度分形分维值为 1.130。根据研究区断裂分维值与萤石矿床空间分布的耦合特征、萤石矿床数量及密度分形特征综合圈定了 3 级有利成矿区, 其中 I 级有利成矿区为成矿条件最佳、成矿潜力最大的区域。根据断裂分维值与矿床空间分布的耦合特征、矿床数量及密度分形特征, 可快速有效圈定受断裂体系控制的萤石矿集区或成矿带内的重点找矿区域。

关键词: 兴国—宁都成矿带; 断裂构造; 萤石矿床; 分形结构; 应用前景

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220186

中图分类号: P542.3; P619.2

文献标志码: A

Fractal Structure and Application Prospect of Xingguo – Ningdu Fluorite Metallogenic Belt in Southern Jiangxi, China

Cui Zhongliang¹, Zhou Jiayi^{2, 3}, Luo Kai^{2, 3}

收稿日期: 2022–06–25

作者简介: 崔中良(1990—), 男, 讲师, 主要从事成矿规律与找矿预测方面的研究, E-mail: c18468068820@vip.163.com

通信作者: 周家喜(1982—), 男, 研究员, 主要从事战略性关键矿产资源成矿理论与找矿预测方面的研究, E-mail: zhoujiayi@ynu.edu.cn

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ213014); 云南大学科研启动项目(YJRC4201804)

Supported by the Science and Technology Project Founded by the Education Department of Jiangxi Province (GJJ213014) and the Research Startup Project of Yunnan University (YJRC4201804)

- 1. *Guanghua Institute of Gems and Art Design, Jiangxi University of Applied Science, Nanchang 330100, China*
- 2. *School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China*
- 3. *Key Laboratory of Critical Minerals Metallogeny in University of Yunnan Province, Kunming 650500, China*

Abstract: As one of the important non-metallic strategic mineral resources, the metallogenic regularity, ore prospecting and exploration of fluorite are widely investigated by economic geologists. The Xingguo – Ningdu metallogenic belt in southern Jiangxi Province, located at the intersection of the NE-trending Wuyishan metallogenic belt and EW-trending Nanling metallogenic belt, develops a series of fluorite deposits. Previous studies have primarily attributed the deposits to fault control, but the quantitative characterization of the coupling relationship between fractures and the spatial distribution of the fluorite deposits is seldom reported. Based on fractal theory, this paper aims to describe the fractal textural characteristics between fractures and fluorite deposits in Xingguo – Ningdu metallogenic belt to identify key ore-forming and prospecting areas of fluorite. The results show that: 1) The NE – NNE – trending fracture capacity dimension, information dimension and correlation dimension of the study area are 1.609 0, 1.608 9, and 1.594 7, respectively, indicating superior metallogenic geological conditions and a strong relationship between NE – NNE faults and fluorite mineralization in the study area; 2) The capacity dimension, information dimension and correlation dimension of fluorite deposits are 0.937 9, 0.921 5 and 0.926 2, respectively. When there is a statistical center deposit, the fractal dimension of the number fractal distribution of fluorite deposits is 0.784 1, and the fractal dimension of the density fractal distribution is 0.784. When there is no statistical center deposit, the fractal dimension of the number fractal distribution of fluorite deposits is 1.129 6, and the fractal dimension of the density fractal distribution is 1.130; 3) According to the coupling characteristics of the fractal dimension value of fracture and the spatial distribution of fluorite deposits in the study area, as well as the fractal characteristics of the number and density of fluorite deposits, the three-level favorable metallogenic areas are comprehensively delineated, in which the I-level favorable metallogenic area is the area with the best metallogenic condition and the largest metallogenic potential; 4) According to the coupling characteristics of fracture dimension value and spatial distribution of deposits, the number and density fractal characteristics of deposits, the key ore forming and prospecting areas in the fluorite ore concentration area or metallogenic belt controlled by fracture system can be quickly and effectively delineated, which is expected to provide important reference information for the resource exploration of fluorite.

Key words: Xingguo – Ningdu metallogenic belt; fracture structure; fluorite deposit; fractal texture; application prospect

0 引言

萤石的化学成分是 CaF_2 , 被列入美国、欧盟等发达国家关键性矿种目录^[1-5], 亦是我国重要的战略性新兴矿产^[5-9]。萤石主要用于冶金、建材、陶瓷等工业领域^[10-12], 目前在新一代信息技术、新医药、新能源等新兴产业领域的重要性日益凸显^[13-15]。随着我国对萤石矿产需求的快速增长及萤石矿产国际地位的不断提升, 深入研究萤石成矿规律及找矿方向具有十分重要的现实意义。

赣南兴国—宁都成矿带萤石资源丰富, 已发现众多中、大型萤石矿床, 成矿潜力巨大。区内萤石矿床明显受断裂构造控制^[16-23]。以往对研究区萤石矿床的研究主要集中在矿床地质^[16, 19, 21, 24]、成矿流体^[16-17, 25-26]、成矿物质^[16, 21, 24, 27]、成岩成矿年代学^[28-32]和矿床成因^[20-21, 24, 26, 33]等方面, 而断裂构造和萤石矿床空间分布的定量表征及两者之间的耦合关系鲜有报道。

分形理论由 B.B.Mandelbrot^[34]创立, 该理论既为非线性科学的前沿和重要分支, 又是一门新兴的

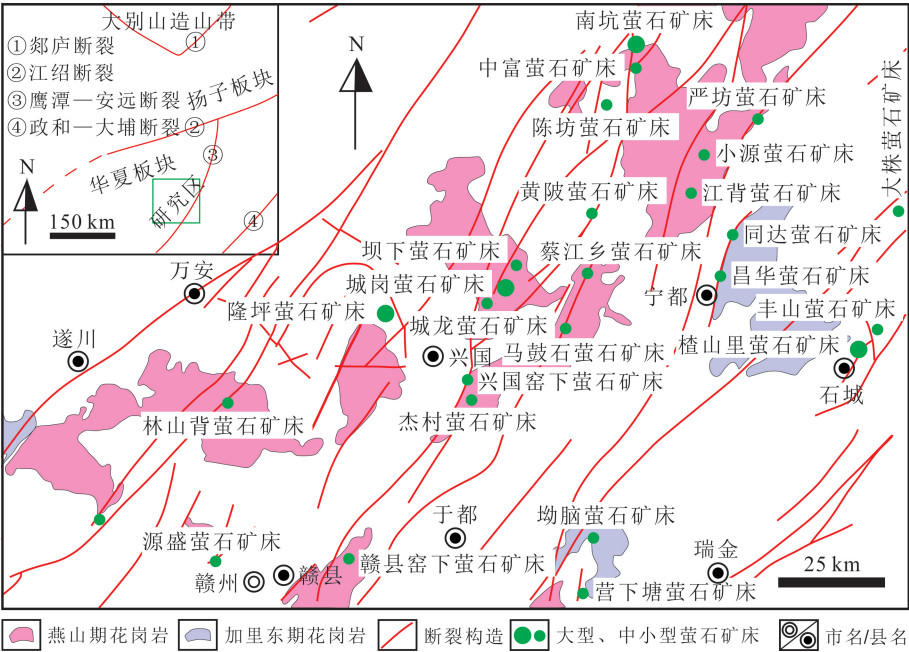
横断学科,主要用于研究结构复杂的形体或系统。一般认为,断裂和矿床的形成机制均与复杂的非线性动力学过程有关,是极端的地质事件。极端地质事件的度量是典型的复杂性问题,无法采用经典数理方程进行定量模拟和预测^[35]。而分形理论可以精细描述复杂结构并量化揭示隐藏的规律,能够对复杂和不规则的地质现象进行客观描述和定量表征,目前已在地质学领域得到广泛应用^[36-44]。其中在断裂构造复杂程度定量表征^[45-47]、矿床(点)丛集结构刻画^[39,46-47]、元素地球化学奇异性测度^[35-38,40-44,48]、含矿脉体形态及品位分析^[49]和岩石孔隙结构复杂性评价^[50-51]等方面已取得长远进步。因此,本文拟通过分形理论刻画赣南兴国—宁都成矿带断裂构造和萤石矿床空间分布的分形结构特征,并根据断裂构造分维值与矿床空间分布的耦合特征、矿床数量及密度分形特征,探讨下一步重点找矿区域,最后分析分形找矿方法的应用前景,以期为类似主要受断裂体系控矿的成矿带或矿集区找矿提供新的思路。

1 地质概况

赣南兴国—宁都萤石成矿带位于欧亚大陆板块

与滨西太平洋板块消减带的内侧华夏板块^[21-22],地处 NE 向武夷山成矿带与 EW 向南岭成矿带的交汇复合部位^[19,26,30],北侧与江绍断裂相邻,东南部与政和—大埔断裂相邻(图 1)。研究区地层自新元古界青白口系至第四系,除奥陶系、志留系和三叠系缺失外,其他均有出露。研究区断裂构造发育,以 NE—NNE 向为主,NW 向次之(图 1)。区内萤石矿床主要受 NE—NNE 向深大断裂及其次生断裂控制^[17,21-22,27]。岩浆活动强烈,其中燕山期岩浆活动最为剧烈,加里东期次之(图 1)。

萤石是赣南的非金属优势资源,兴国—宁都成矿带萤石矿床尤为丰富,目前已发现南坑、楂山里、城岗、隆坪、江背、同达、坳脑等中、大型萤石矿床。研究区萤石矿床主要赋存于硅化断裂破碎带中^[16,19-23,25,27],赋矿围岩以花岗岩和浅变质岩为主^[17,19-21,24]。从产出状态来看,为单一萤石矿床,主要呈脉状、透镜状产出。从矿床成因来看,主要为热液充填型矿床^[16,19,21,24,31]。综上,区内萤石矿床主要为热液充填型矿床且明显受断裂构造控制,说明研究区具备开展定量探讨断裂构造与矿床分布耦合关系的前提条件。



据文献[27]修编。

图 1 赣南兴国—宁都成矿带断裂构造及萤石矿床分布图

Fig.1 Distribution map of fluorite deposits and fracture structures in Xingguo - Ningdu metallogenic belt, southern Jiangxi

2 断裂构造分形特征

2.1 分维值计算方法

2.1.1 概述

在传统的欧式几何中,人们习惯以整数维来描述事物,然而很多现象无法用传统的欧式几何描述^[52]。分形理论采用分数维(分维值)来描述客观事物,更加趋近复杂结构或系统真实属性和状态的描述。也就是说,分维值是对研究对象空间占有规模及复杂程度进行精确量度的工具,其值大小可以反映研究对象的空间占有度和复杂程度。

随着分形理论在各个领域的应用和发展,分维值逐渐衍生出了新的内涵。系统梳理现有的研究成果^[46,53-60]可知,在断裂分形研究中目前公认的3条基本结论:1)断裂体系具有分形特征;2)断裂构造分维值与断裂(地质体)连通性相关,即随着断裂构造分维值的增大,断裂构造的空间分布愈来愈复杂,断裂(地质体)的渗透性越来越强,连通性越来越好,从而愈有利于成矿元素的活化及成矿流体的运移;3)断裂构造分维值与地质成矿之间具有紧密联系,可作为成矿预测的指标。然而在断裂分形与矿床分布的耦合研究中,矿床空间“定位”预测的研究成果报道较少,亟需对此进行深入探索。

对不同岩性岩石块体进行二轴压缩试验的数值模拟表明^[61]:当断裂分布分维值小于“某个值”时,断裂的变形及渗透性较小,断裂呈孤立状,连通性较差;而当达到或高于“某个值”时,断裂的变形和渗透性较大,断裂的连通性较好。“某个值”即为断裂临界分维值,大小为1.22~1.38。分形计算时,若采用的研究标度与构造规模相匹配,则岩石块体的断裂临界分维值仍具有较强借鉴性,即研究区整体分维值与断裂临界分维值的比较可以反映研究区整体成矿构造条件的优劣。实际研究中往往会把研究区划分为多个区域,简称分区。通过统计分区分维值与分区发育矿床的数量和规模,结合分区的空间位置,可以确定适合矿床寄宿的有利条件。从构造控矿的角度来看,有利于成矿流体局域化分布(成矿流体的聚集)的区域应满足^[45-47]:1)本身分维值较高,利于成矿流体的运移;2)邻区分维值较低,有利于对成矿流体的阻挡、圈闭。

分维值的计算方法有很多种,本文断裂构造的分形计算采用改变观察尺度求分维值的方法,其基

本过程主要包括:1)选择合适的研究底图;2)确定恰当的观察尺度(研究标度) r_j ($r_j/r_{j-1}=2$);3)采用不同观察尺度的二维正交网格(正方形网格)覆盖研究区;4)统计覆盖到断裂构造的网格数 $N(r_j)$ 或计算断裂构造的信息量 $I(r_j)$;5)以 $\ln r_j$ 为横坐标,以 $\ln N(r_j)$ 或 $I(r_j)$ 为纵坐标,利用Excel绘制回归拟合直线,直线斜率的绝对值即为所求分维值。

2.1.2 容量维、信息维、关联维计算方法

本文以研究区断裂构造及萤石矿床分布图(图1)为底图,采用的容量维、信息维、关联维计算公式详见文献^[46,62]。断裂体系可开展分形计算的前提条件是断裂体系可视为“线集”,因此从这个角度上来说,观察尺度不应太小。而在实际的计算中,还应确保同一观察尺度的二维正交网格在覆盖研究区时既不发生重叠,又能恰好覆盖研究区。除此之外,观察尺度的确定还需结合具体研究区域(成矿带或次级成矿区域)的规模大小,因为其约束了观察尺度的上限。因此研究区NE-NNE向断裂构造分维值计算时采用的观察尺度分别为71.945、35.972、17.986、8.993、4.497 km(图2a)。

对研究区整体和局部(分区)断裂构造开展分维值计算时,为弱化观察尺度对计算结果的影响,采用的观察尺度应尽可能相同。因此在计算过程中一般选择已建立的同一观察尺度的二维正交网格作为分区。若采用边长为71.945 km的二维正交网格作为分区,分区的数量太少且不足以分析断裂构造分维值与矿床空间分布的耦合关系,而若采用边长为17.986、8.993、4.497 km的二维正交网格作为分区,则可供选择的观察尺度数量明显不足,因此选择边长为35.972 km的二维正交网格作为分区(图2b)。

具体步骤如下:1)分别采用边长 r 为71.945、35.972、17.986、8.993、4.497 km的二维正交网格覆盖研究区(图2a),统计NE-NNE向断裂构造覆盖到的网格数 $N(r)$,并计算其信息量 $I(r)$ 。利用Excel绘制回归拟合直线,得到研究区NE-NNE向断裂构造的容量维、信息维和关联维;2)将边长为35.972 km的二维正交网格进行编号(图2b),对于每个分区,分别以边长17.986、8.993、4.497 km的二维正交网格覆盖,统计各个分区覆盖断裂构造的网格数,并计算各个分区断裂构造的信息量。利用Excel绘制回归拟合直线,得到24个分区各自所覆盖断裂构造的容量维、信息维和关联维。

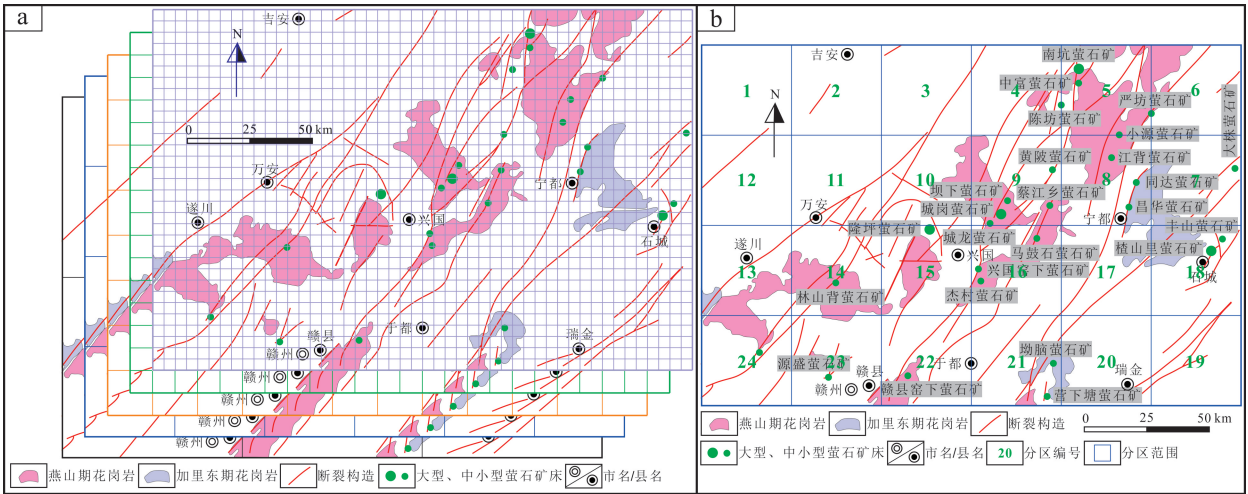


图 2 分维值计算网格覆盖图(a)及分区图(b)

Fig.2 Grid coverage graph (a) and partition graph (b) for fractal calculation

2.2 NE - NNE 向断裂构造分形特征

研究区 NE - NNE 向断裂构造分维值计算参数统计见表 1,根据表 1 中的统计参数绘制 NE - NNE 向断裂分维值计算线性拟合图(图 3)。从图 3 可以看出:1)3 条回归拟合直线的判定系数(拟合度) R^2 分别为 0.989 2、0.995 0、0.998 1,直线的整体拟合度较高,说明了在研究标度 4.497~71.945 km 范围内,研究区内断裂构造具有很好的统计自相似性;2)研究区 NE - NNE 向断裂容量维、信息维、关联维分别为 1.609 0、1.608 9、1.594 7;3)断裂构造分维值越大,断裂构造的空间分布愈复杂,断裂(地质体)的渗透性越强,也就越有利于成矿元素的活化及成矿流体的运移、聚集。从断裂临界分维值(1.22~1.38)^[61] 来看,研究区 NE-NNE 向断裂容量维为

1.609 0,这说明研究区整体成矿地质条件优越,NE - NNE 向断裂与研究区萤石成矿关系密切;这与研究区萤石矿床主要受 NE - NNE 向断裂构造控制的地质事实相吻合。

2.3 分区断裂构造分形特征

分区断裂构造分维值计算参数统计见表 2、表 3 和表 4。分区容量维、信息维、关联维的拟合直线的判定系数分别为 0.963 6~1.000 0、0.973 8~1.000 0、0.977 7~1.000 0,直线拟合度较高,说明分区内断裂构造具有很好的统计自相似性。分区容量维为 0.000 0~1.745 9,中位数为 1.354 5,均值为 1.231 9,标准差为 0.372 6;信息维为 0.000 0~1.747 2,中位数为 1.405 8,均值为 1.268 8,标准差为 0.383 8;关联维为 0.000 0~1.741 9,中位数为 1.420 5,均值为 1.285 1,标准差为 0.388 6。

表 1 研究区 NE - NNE 向断裂构造分维值计算参数统计表

Table 1 Statistical table of calculation parameters of fractal dimension for NE - NNE trending fracture in the study area

参数		容量维		信息维	关联维
r/km	$\ln(r/\text{km})$	$N(r)$	$\ln N(r)$	$I(r)$	$I(r)$
71.945	4.276	6	1.792	1.757	1.724
35.972	3.583	24	3.178	3.039	2.952
17.986	2.890	85	4.443	4.266	4.100
8.993	2.196	222	5.403	5.286	5.158
4.497	1.503	521	6.256	6.210	6.148

3 矿床空间分布分形丛集结构

3.1 计算方法

1)矿床空间分布容量维、信息维和关联维的计算方法与断裂构造容量维、信息维和关联维的计算方法基本相同,此处不再叙述。不同的是,分维值计算时,断裂构造视为“线集”,矿床视为“点集”,这就决定了在明显受断裂构造控矿的区域(矿集区或成矿带),对断裂构造和矿床采用同一套有效的研究标度时,断裂构造的空间分布分维值(如容量维)必定大于矿床空间分布分维值(如容量维)。

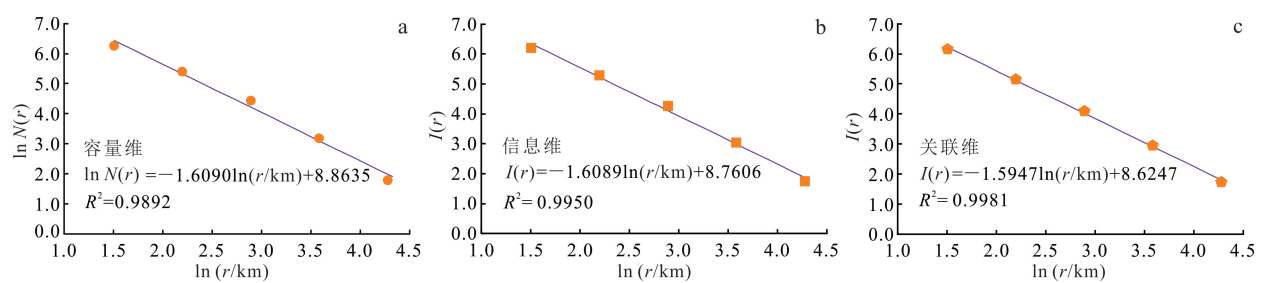


图 3 研究区 NE - NNE 向断裂构造容量维(a)、信息维(b)和关联维(c)计算线性拟合图

Fig.3 Linear fitting diagram for calculation of NE - NNE trending fracture structure capacity dimension (a), information dimension (b) and correlation dimension (c)

表 2 分区断裂构造容量维计算参数统计表

Table 2 Statistical table of partition fracture capacity dimension calculation parameters

表 3 分区断裂构造信息维计算参数统计表

Table 3 Statistical table of calculation parameters of partition fracture information dimension

分区编号	分形标度/km			容量维	判定系数
	17.986	8.993	4.497		
1	1	1	1	0.000 0	1.000 0
2	2	4	6	0.792 5	0.977 7
3	4	6	11	0.729 7	0.987 1
4	4	10	27	1.377 4	0.999 5
5	4	14	39	1.642 7	0.996 7
6	4	8	16	1.000 0	1.000 0
7	3	7	19	1.331 5	0.997 8
8	4	12	27	1.377 4	0.992 5
9	4	16	45	1.745 9	0.993 0
10	4	12	29	1.429 0	0.996 0
11	3	7	18	1.292 5	0.999 0
12	3	5	9	0.792 5	0.998 4
13	4	8	16	1.000 0	1.000 0
14	4	12	29	1.429 0	0.996 0
15	4	14	36	1.585 0	0.993 5
16	4	12	27	1.377 4	0.992 5
17	4	10	25	1.321 9	1.000 0
18	4	11	22	1.229 7	0.988 5
19	3	8	22	1.437 2	0.999 9
20	3	5	14	1.111 2	0.963 6
21	4	12	31	1.477 1	0.998 2
22	4	13	30	1.453 4	0.990 5
23	4	9	21	1.196 2	0.999 8
24	3	11	22	1.437 2	0.970 1

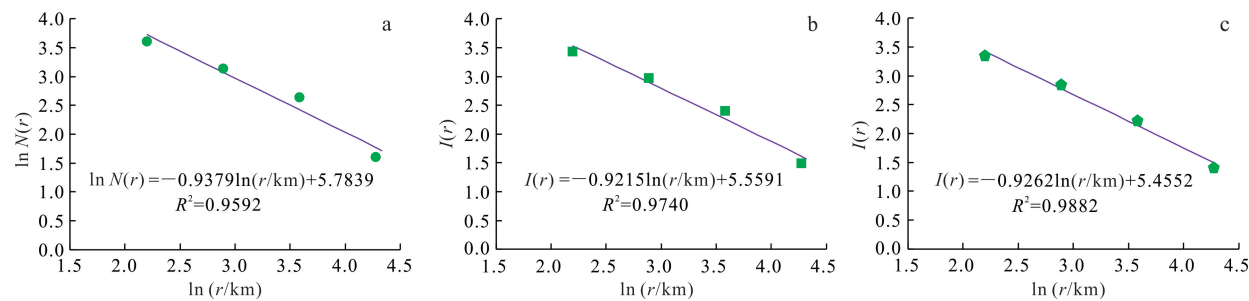
分区编号	分形标度/km			信息维	判定系数
	17.986	8.993	4.497		
1	0.000	0.000	0.000	0.000 0	1.000 0
2	0.693	1.386	1.792	0.792 5	0.977 7
3	1.332	1.748	2.369	0.748 2	0.987 0
4	1.162	2.160	3.224	1.486 9	0.999 7
5	1.373	2.533	3.622	1.622 2	0.999 7
6	1.332	2.079	2.773	1.039 0	0.999 5
7	0.950	1.834	2.912	1.415 4	0.996 8
8	1.321	2.441	3.296	1.424 6	0.994 0
9	1.362	2.692	3.785	1.747 2	0.996 8
10	1.295	2.406	3.322	1.462 9	0.996 9
11	0.860	1.817	2.837	1.426 2	0.999 7
12	1.099	1.609	2.197	0.792 5	0.998 4
13	1.386	2.079	2.773	1.000 0	1.000 0
14	1.029	2.329	3.259	1.609 1	0.990 9
15	1.305	2.446	3.536	1.608 9	0.999 8
16	1.369	2.425	3.263	1.366 0	0.995 5
17	1.277	2.254	3.219	1.400 7	1.000 0
18	1.255	2.338	3.045	1.290 7	0.985 5
19	1.089	2.014	3.045	1.410 9	0.999 0
20	0.950	1.550	2.599	1.189 5	0.975 8
21	1.280	2.389	3.389	1.521 2	0.999 1
22	1.311	2.479	3.379	1.492 0	0.994 4
23	1.342	2.144	3.015	1.206 7	0.999 4
24	1.099	2.342	3.035	1.396 9	0.973 8

表 4 分区断裂构造关联维计算参数统计表

Table 4 Statistical table of calculation parameters of partition fracture correlation dimension

分区编号	分形标度/km			关联维	判定系数
	17.986	8.993	4.497		
1	0.000	0.000	0.000	0.000 0	1.000 0
2	0.693	1.386	1.792	0.792 5	0.977 7
3	1.273	1.695	2.331	0.763 0	0.986 5
4	1.035	2.039	3.140	1.519 0	0.999 3
5	1.362	2.425	3.570	1.593 1	0.999 6
6	1.273	2.079	2.773	1.081 7	0.998 1
7	0.821	1.715	2.870	1.478 2	0.994 6
8	1.269	2.388	3.296	1.462 4	0.996 4
9	1.339	2.624	3.753	1.741 9	0.998 6
10	1.240	2.334	3.269	1.463 0	0.998 0
11	0.718	1.720	2.793	1.496 8	0.999 6
12	1.099	1.609	2.197	0.792 5	0.998 4
13	1.386	2.079	2.773	1.000 0	1.000 0
14	0.778	2.193	3.122	1.690 9	0.985 9
15	1.241	2.274	3.479	1.614 5	0.998 0
16	1.350	2.371	3.219	1.348 2	0.997 2
17	1.184	2.197	3.219	1.468 0	1.000 0
18	1.163	2.281	2.990	1.317 7	0.983 6
19	1.079	1.962	2.990	1.378 5	0.998 1
20	0.821	1.494	2.549	1.246 8	0.983 9
21	1.204	2.303	3.315	1.522 8	0.999 4
22	1.259	2.392	3.348	1.506 9	0.997 6
23	1.299	2.100	2.975	1.208 9	0.999 3
24	1.099	2.282	2.976	1.353 9	0.977 7

2)定量探讨已知矿床周边一定距离范围内的矿床分布特征常采用概率密度相关函数:



a. 容量维计算线性拟合图; b. 信息维计算线性拟合图; c. 关联维计算线性拟合图。

图 4 矿床空间分布分维值计算线性拟合图

Fig.4 Linear fitting graph for fractal dimension calculation of spatial distribution of ore deposits

$$d(r)=Kr^{D_m-2}(2>D_m>0)。(1)$$

式中: $d(r)$ 为概率密度函数; r 为研究标度; K 为常数; D_m 为密度分形分维值。相同无标度区内, D_m 越大,矿床越聚集^[39,63]。研究过程中除采用概率密度相关函数外,为定量探讨已知矿床周边一定距离范围内矿床的数目,建立如下函数:

$$Q(r)=Lr^{D_s}。(2)$$

式中: $Q(r)$ 为数量分形分布函数; L 为常数; D_s 为数量分形分维值。实际计算中,本文依次选取南坑、隆坪、楂山里、城岗 4 个大型萤石矿床为统计中心矿床,并分别确定其周围不同标度(距离)下的矿床数量及密度,然后取平均值,最后对数据进行拟合。

3.2 容量维、信息维和关联维

分维值计算时,萤石矿床均视为“点集”,为准确统计萤石矿床所处不同标度下所占据盒子的位置及数量,最大程度提高统计和计算准确率,本文萤石矿床分维值计算采用的研究标度为 8.993~71.945 km。研究区矿床分布分维值计算参数统计见表 5。根据表 5 中的统计参数绘制出研究区矿床分布分维值计算线性拟合图(图 4)。从图 4 可以看出,研究区萤石矿床容量维、信息维、关联维分别为 0.937 9、0.921 5、0.926 2。

表 5 萤石矿床分布分维值计算参数统计表

Table 5 Statistical table of calculation parameters of fractal dimension of fluorite deposit distribution

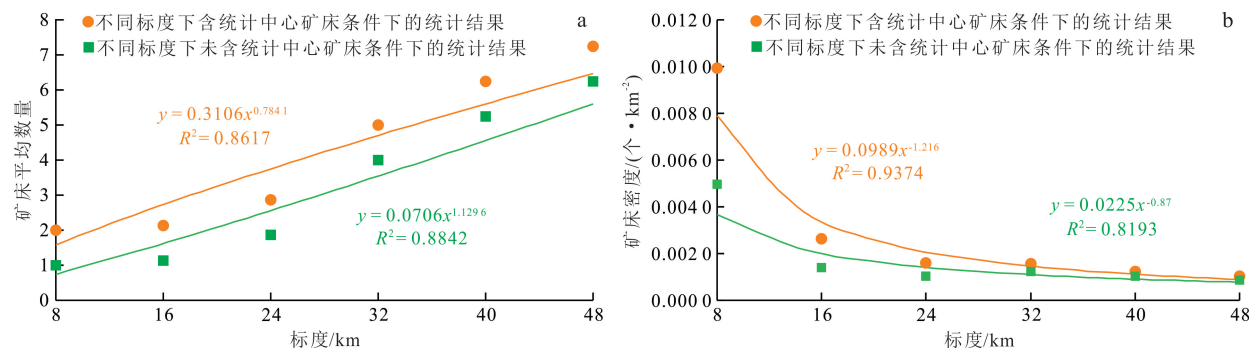
参数			容量维	信息维	关联维
r/km	$\ln(r/\text{km})$	$N(r)$	$\ln N(r)$	$I(r)$	$I(r)$
71.945	4.276	5	1.609	1.494	1.413
35.972	3.583	14	2.639	2.405	2.226
17.986	2.890	23	3.135	2.977	2.846
8.993	2.196	37	3.611	3.432	3.347

3.3 矿床数量及密度分形特征

矿床数量及密度分形分布数据统计见表 6。根据表 6 绘制矿床数量及密度分形分布拟合图(图 5)。从表 6 和图 5 可以看出:1)在研究标度 8~48 km内,随着研究标度的增加,萤石矿床平均数量逐步增加,而密度则逐步降低;2)萤石矿床的研究标度-矿床平均数量、研究标度-矿床密度呈幂律关系。在含统计中心矿床时,萤石矿床数量分形分维值为 0.784 1,密度分形分维值为 0.784;而在未含统计中心矿床时,萤石矿床数量分形分维值为 1.129 6,密度分形分维值为 1.130;说明在研究标度为 8~48 km时,研究区整体萤石矿床的丛集性小于中小型萤石矿床的丛集性;3)根据点与拟合曲线的相对位置关系,可以看出距离统计中心矿床(南坑、隆坪、楂山里、城岗)大于 8 km 且小于 32 km 的范围内存在“萤石矿床分布亏损区”,暗示该区可能存在未被发现的萤石矿床。

表 6 矿床数量及密度分形分布数据统计表
Table 6 Statistics table of fractal distribution data of deposit number and density

标度/km	含统计中心矿床(全部矿床)		未含统计中心矿床	
	平均数量	密度/ (个·km ⁻²)	平均数量	密度/ (个·km ⁻²)
8	2.000	0.009 952 229	1.000	0.004 976 115
16	2.125	0.002 643 561	1.125	0.001 399 532
24	2.875	0.001 589 592	1.875	0.001 036 691
32	5.000	0.001 555 036	4.000	0.001 244 029
40	6.250	0.001 244 029	5.250	0.001 044 984
48	7.250	0.001 002 134	6.250	0.000 863 909



a. 矿床数量分形分布拟合图;b. 矿床密度分形分布拟合图。

图 5 矿床数量及密度分形分布拟合图

Fig.5 Fitting diagram of fractal distribution of deposit number and density

4 讨论

4.1 断裂构造分维值与矿床空间分布耦合关系

从矿集区尺度来看,研究区萤石矿床的分布明显受断裂构造控制。为探讨断裂构造分维值与矿床空间分布耦合关系,绘制分区分维值横纵波动图(图 6)、分区分维值-矿床数量投影图(图 7)、容矿分区分维值投影图(图 8)和分维值等值线图(图 9)。断裂构造分维值可以表征断裂连通性,即断裂构造分维值越大,则其连通性越好。而断裂构造分维值较低的地区连通性较差,亦可起到相对的阻挡作用,从而增加含矿流体的局域化分布^[45]。在川滇黔矿集区^[45]、黔西北垭都—蟒河成矿带^[46]、河南熊耳山矿集区^[47]开展断裂分维值与矿床空间分布耦合关系的研究中,发现在明显受断裂体系控制的矿集区(或成矿带),矿床的有利分布区域应满足 2 个条件:1)本身分维值较高,利于成矿流体流通、渗透;2)邻区分维值较低,利于阻挡、封闭成矿流体。从赣南兴国—宁都成矿带来看,发育萤石矿床的分区联合体均存在处于波峰位置的分区(图 6),且主要分布于容量维大于 1.22、信息维大于 1.29、关联维大于 1.31 的分区(图 7、图 8)。从断裂分维值等值线图(图 9)来看,研究区分维值等值线展布趋势与 NE 向构造线方向基本吻合,且绝大多数萤石矿床分布于分维值较高区域(灰白色区域),说明研究区萤石矿床空间分布与分维值有很好的耦合关系,同时也印证了研究区萤石矿床分布主要受断裂构造控制的观点。

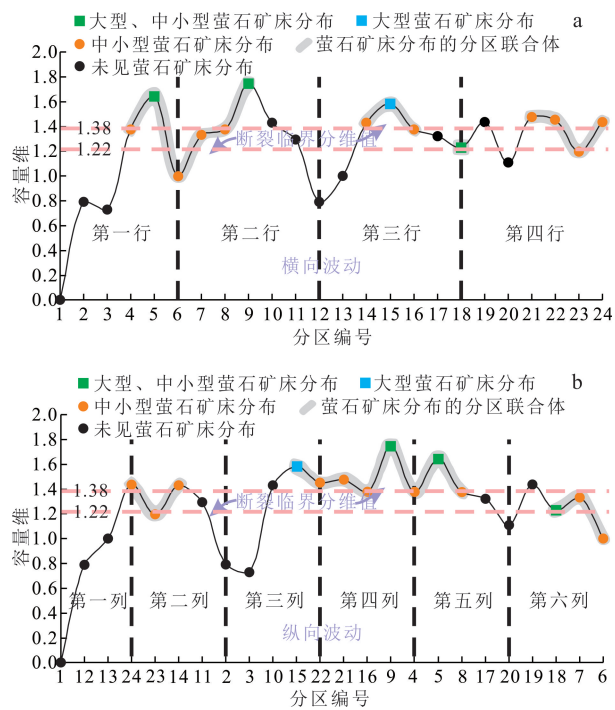


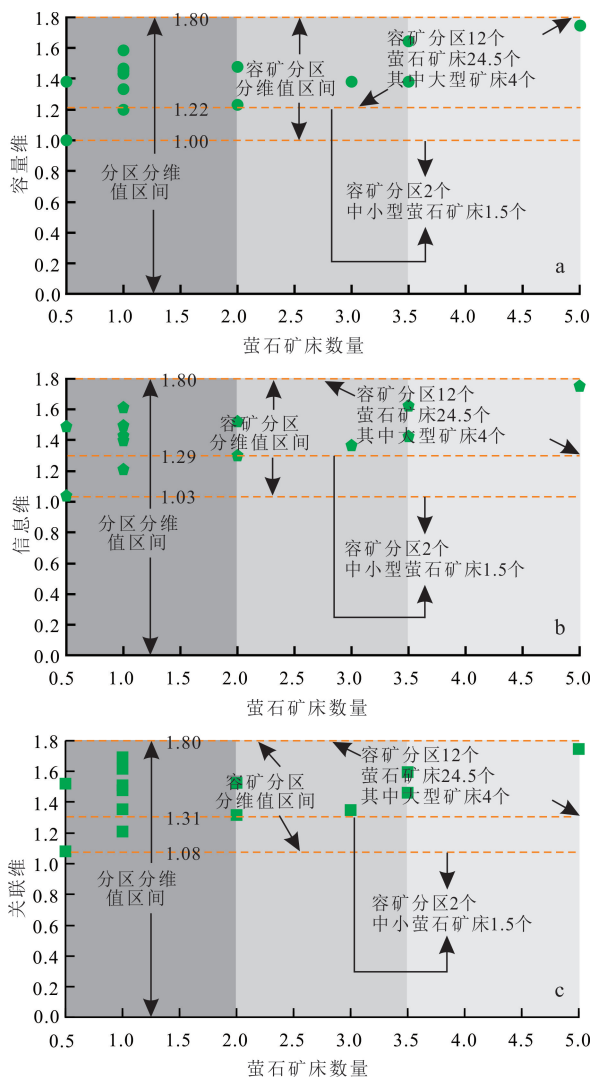
图 6 分区分维值横向波动图(a)和纵向波动图(b)

Fig. 6 Horizontal fluctuation diagram (a) and vertical fluctuation diagram (b) of divisional fractal dimension value

4.2 找矿方向启示

4.2.1 断裂分形对有利成矿区的指示

从定性的角度来看,研究区有利于萤石矿床分布的区域应存在相对阻挡、封闭成矿流体的邻区。从定量的角度来看,研究区萤石矿床主要分布于容量维大于 1.22、信息维大于 1.29、关联维大于 1.31 的地区。基于此,分别圈定容量维有利成矿区(图 10a)、信息维有利成矿区(图 10b)、关联维有利成矿区(图 10c),并根据成矿潜力的相对大小划分为成矿流体相对汇集区(I-1 至 I-3)和次级相对汇集区(II-1 至 II-3)。成矿流体相对汇集区(I-1 至 I-3)分布着研究区目前已知的绝大多数萤石矿床,次级相对汇集区(II-1 至 II-3)目前仅见少数已知的萤石矿床。I-1 至 I-3 交叉重叠的区域,即容量维大于 1.22、信息维大于 1.29、关联维大于 1.31 的区域,为 I 区(图 10d),是断裂构造分维值综合考量最有利成矿区;非交叉重叠的区域为 II 区,紧邻 I 区;II-1 至 II-3 交叉重叠的区域为 III 区,为断裂构造分维值综合考量相对有利成矿区(图 10d)。



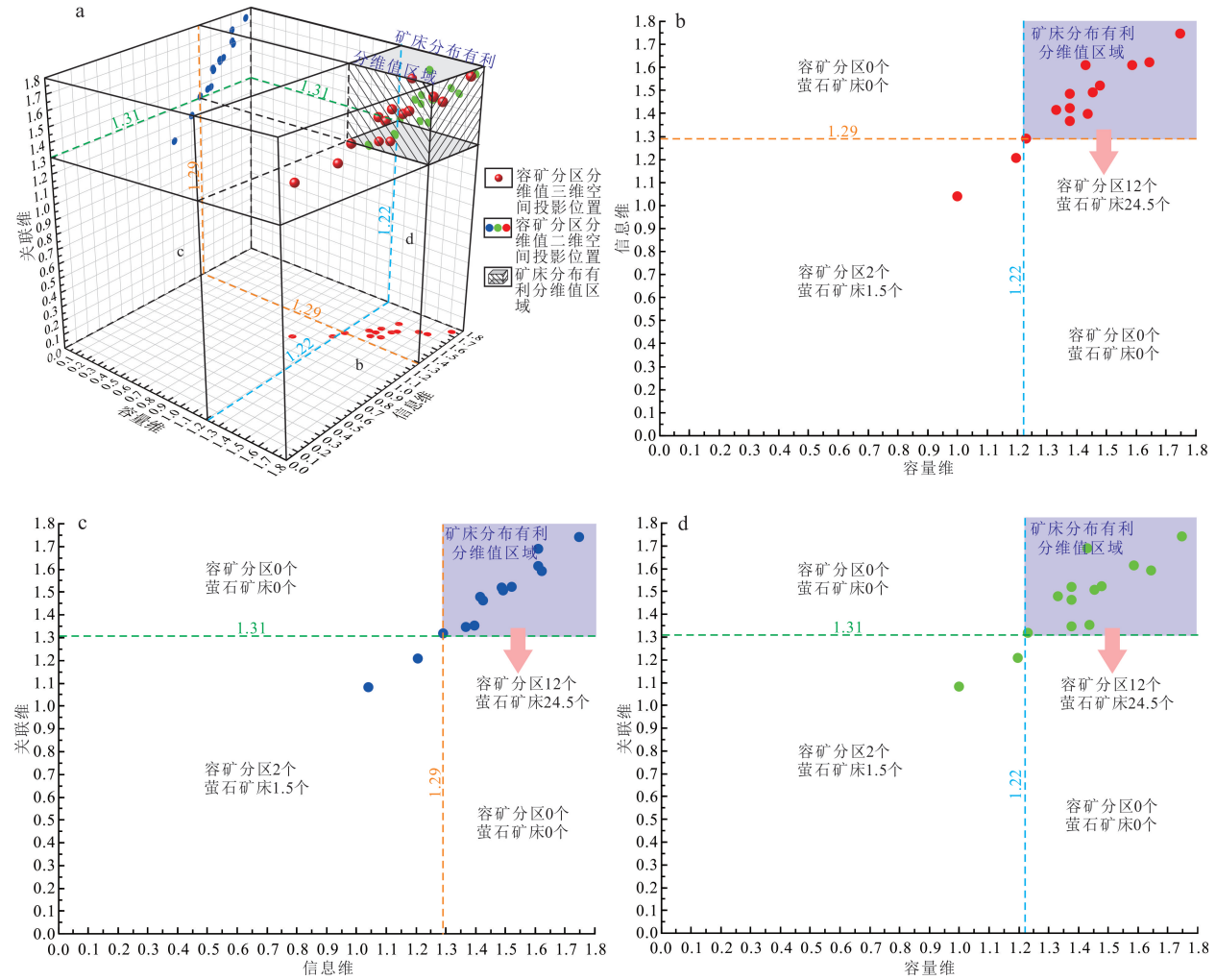
a. 分区分维值-矿床数量投影图;b. 分区分维值-矿床数量投影图;c. 分区分维值-矿床数量投影图。

图 7 分区分维值-矿床数量投影图

Fig.7 Fractal dimension versus number of deposits plot

4.2.2 萤石矿床数量及密度分形对有利成矿区的指示

根据对极端地质事件的定义^[35,38],成矿事件的本质特征是极小的时空尺度下产生极大的能量和物质,因此矿床在时间和空间上的分布必然不是均匀的,而是呈现明显的丛集性。这种丛集性往往体现为矿床时空分布的幂律性,即分形。本文萤石矿床数量及密度分形计算即是对这种丛集性的度量。根据萤石矿床数量及密度分形的计算结果,距离统计中心矿床(南坑、隆坪、楂山里、城岗)大于 8 km 且小于 32 km 的范围内存在明显的“萤石矿床分布亏损区”,这说明研究区很有可能还存在未被发现的萤



a. 容矿分区三维投影图;b. 容矿分区容量维-信息维投影图;c. 容矿分区信息维-关联维投影图;d. 容矿分区容量维-关联维投影图。

图 8 容矿分区分维值投影图

Fig.8 Fractal dimension values plot of ore-bearing partition

石矿床,暗示研究区仍有较大的找矿潜力。

4.2.3 断裂、矿床分形特征的综合指示

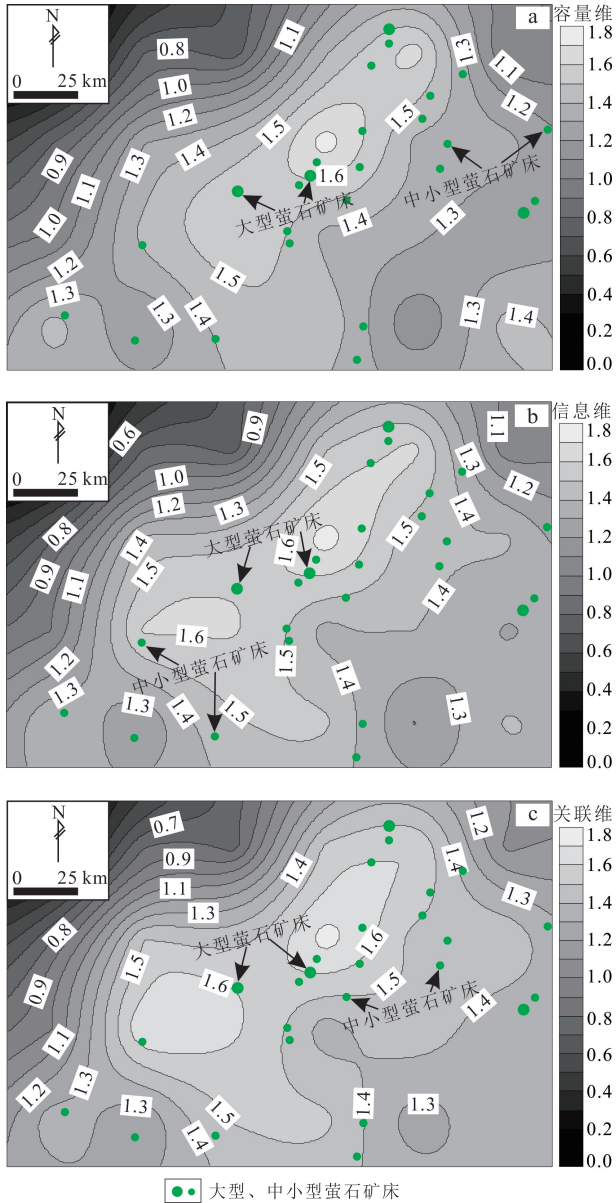
绘制断裂分维值综合考量有利成矿区与“萤石矿床分布亏损区”的叠加图(图 11a)和断裂、矿床分形分析综合有利成矿区(图 11b),并分别分析研究区内、外部成矿潜力。

研究区外部成矿潜力分析:与研究区北部和东部相接区域均存在“萤石矿床分布亏损区”,而这些区域位于断裂分维值综合考量Ⅲ区的外延区域(图 11a),因此这些区域可能具有一定成矿潜力;与研究区南部相接区域为仍未闭合的Ⅰ至Ⅲ区的外延区域(图 11a),十分有利于含矿流体的运移和聚集,成矿潜力巨大。

研究区内部成矿潜力分析:研究区内Ⅱ和Ⅲ区与距离统计中心矿床(南坑、隆坪、楂山里、城岗)小于 32 km 范围的叠合区域和Ⅰ区为断裂、矿床分形分析Ⅰ级综合有利成矿区。Ⅰ级综合有利成矿区的分形背景较佳,适合矿床寄宿,是研究区成矿潜力最大的区域。Ⅰ区与距离统计中心矿床(南坑、隆坪、楂山里、城岗)小于 32 km 范围的叠合区域为重点有利成矿区。重点有利成矿区位于Ⅰ级综合有利成矿区内,找矿潜力巨大,是整个研究区中最值得进一步开展找矿工作的区域之一。除Ⅰ级有利成矿区外,Ⅱ和Ⅲ区剩余地方分别为Ⅱ和Ⅲ级有利成矿区。

4.3 应用前景浅析

根据研究区断裂构造分维值与萤石矿床空间分布的耦合特征、萤石矿床数量及密度分形特征综合圈定的有利成矿区与已知的地质事实基本吻合,充分说明了应用分形理论指导找矿的可靠性。Ⅰ级有利成矿区中发育着目前已知的 4 个大型萤石矿床和绝大多数中小型萤石矿床,分布着大面积与成矿关系最为密切的燕山期和加里东期花岗岩以及主要控矿断裂构造。Ⅱ和Ⅲ级有利成矿区发育的萤石矿床



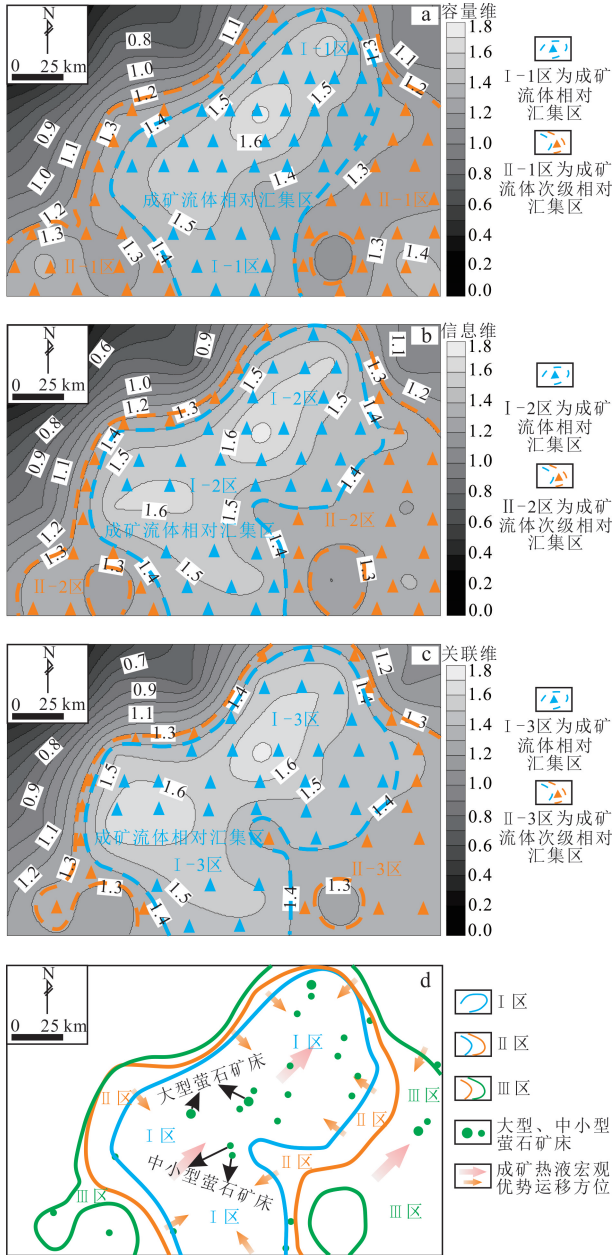
a. 断裂构造容量维等值线图;b. 断裂构造信息维等值线图;c. 断裂构造关联维等值线图。

图 9 断裂构造分维值等值线图

Fig.9 Contour map of fracture fractal dimension

数量较少,且均为中小型,分布的断裂构造、燕山期及加里东期花岗岩亦较少。位于研究区南部的外围有利成矿区目前已发现谢坊大型萤石矿床及若干中小型萤石矿床。

另外,根据断裂构造、矿床分形结构特征的找矿方法既可应用于未知区域找矿,又能为找矿程度较高区域的勘查工作提供思路和线索,在主要受断裂体系控矿的矿集区或成矿带,可快速有效的圈定重



a. 断裂容量维有利成矿区;b. 断裂信息维有利成矿区;c. 断裂关联维有利成矿区;d. 断裂分维值综合考量有利成矿区。

图 10 断裂分维值有利成矿区

Fig.10 Fractal dimension of fracture favorable mining area

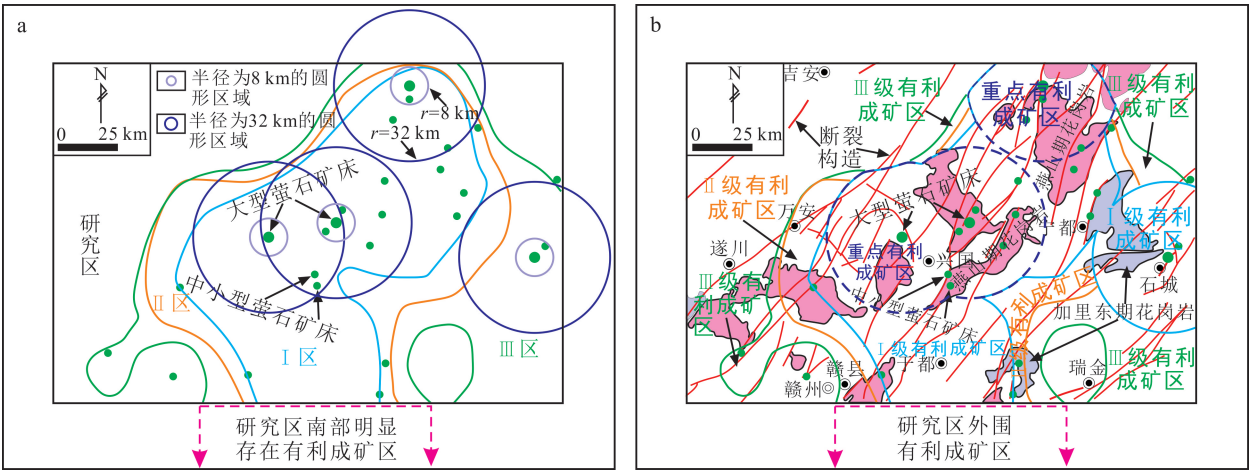


图 11 断裂分维值综合考量有利成矿区与“萤石矿床分布亏损区”的叠加图(a)和断裂、矿床分形分析综合有利成矿区(b)
Fig.11 The favorable ore forming area based on comprehensive consideration of fracture fractal dimension value and ‘fluorite deposit distribution loss area’ overlay map (a) and comprehensive favorable metallogenic area by fractal analysis of fracture and deposit (b)

点找矿区域。相对于传统的地质找矿方法,该方法开展分析所需的地质信息较少,具有成本低、周期短、效果佳的优点,应用前景好。

5 结论

1)在 4.497~71.945 km 的标度范围内,断裂构造具有很好的统计自相似性。研究区 NE-NNE 向断裂构造容量维为 1.609 0、信息维为 1.608 9、关联维为 1.594 7,说明研究区整体成矿地质条件优越,NE-NNE 向断裂构造与萤石成矿关系密切。

2)在 8.993~71.945 km 的标度范围内,研究区萤石矿床容量维、信息维、关联维分别为 0.937 9、0.921 5、0.926 2。在 8~48 km 标度范围内,含统计中心矿床时,萤石矿床数量分形分维值为 0.784 1,密度分形分维值为 0.784,而在未含统计中心矿床时,萤石矿床数量分形分维值为 1.129 6,密度分形分维值为 1.130。

3)赣南兴国—宁都成矿带发育萤石矿床的分区联合体均存在处于波峰位置的分区,绝大多数萤石矿床分布于分维值较高区域,且主要分布于容量维大于 1.22、信息维大于 1.29、关联维大于 1.31 的分区,说明研究区萤石矿床空间分布与分维值有很好的耦合关系。

4)根据断裂构造分维值与萤石矿床空间分布的耦合特征、萤石矿床数量及密度分形特征综合圈定的有利成矿区与已知的地质事实基本吻合。其中 I

级有利成矿区为成矿条件最佳、成矿潜力最大的区域。

5)主要受断裂体系控矿的矿集区或成矿带,根据断裂构造分维值与矿床空间分布的耦合特征、矿床数量及密度分形特征可快速有效的圈定重点找矿区域,具有成本低、周期短、效果佳的优点,应用前景好。

参考文献(References):

[1] 张福良,何贤杰,杜轶伦,等. 关于我国战略性新兴产业几个重要问题的思考[J]. 中国矿业, 2013, 22(10): 7-11.
Zhang Fuliang, He Xianjie, Du Yilun, et al. Discussion on the Related Strategic Mineral of Resources of Strategic Emerging Industries [J]. China Mining Magazine, 2013, 22(10): 7-11.

[2] 金少荣,陈军,代德荣,等. 黔西南高岭萤石矿床微量和稀土元素地球化学特征[J]. 矿物学报, 2018, 38(6): 684-692.
Jin Shaorong, Chen Jun, Dai Derong, et al. Geochemical Characteristics of Trace Elements and REE in the Gaoling Fluorite Deposit, Southwest Guizhou, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2018, 38(6): 684-692.

[3] 郭佳,易继宁,王慧. 全球主要战略性矿产名录评价因素对比研究[J]. 现代矿业, 2018, 34(12): 1-5.
Guo Jia, Yi Jining, Wang Hui. Comparative Study on Evaluation Factors of Global Major Strategic Mineral

- Resources Lists[J]. *Modern Mining*, 2018, 34(12): 1-5.
- [4] 陈军元, 刘艳飞, 颜玲亚, 等. 石墨、萤石等战略非金属矿产发展趋势研究[J]. *地球学报*, 2021, 42(2): 287-296.
- Cheng Junyuan, Liu Yanfei, Yan Lingya, et al. Research on Development Trend of Strategic Nonmetallic Minerals Such as Graphite and Fluorite [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(2): 287-296.
- [5] Pei Q M, Li C H, Zhang S T, et al. Vein-Type Fluorite Mineralization of the Linxi District in the Great Xing'an Range, Northeast China: Insights from Geochronology, Mineral Geochemistry, Fluid Inclusion and Stable Isotope Systematics [J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 142: 1-15.
- [6] 代德荣, 何小虎, 金少荣, 等. 黔西南萤石矿床流体包裹体地球化学特征[J]. *矿物学报*, 2018, 38(6): 693-700.
- Dai Derong, He Xiaohu, Jin Shaorong, et al. Geochemical Characteristics of Fluid Inclusions in Fluorite Deposits, Southwest Guizhou, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2018, 38(6): 693-700.
- [7] 金少荣, 王玉朝, 杨德智, 等. 黔西南高岭萤石矿床地质-地球化学特征与成因[J]. *矿物学报*, 2019, 39(3): 247-252.
- Jin Shaorong, Wang Yuchao, Yang Dezhi, et al. Geological-Geochemical Characteristics and Metallogenesis of the Gaoling Fluorite Deposit in the Southwestern Guizhou, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2019, 39(3): 247-252.
- [8] 方贵聪, 王登红, 陈毓川, 等. 南岭萤石矿床成矿规律及成因[J]. *地质学报*, 2020, 94(1): 161-178.
- Fang Guicong, Wang Denghong, Chen Yuchuan, et al. Metallogenic Regularities and Genesis of the Fluorite Deposits in Nanling Region [J]. *Acta Geological Sinica*, 2020, 94(1): 161-178.
- [9] 朱利岗, 金松, 王春连, 等. 福建浦城地区萤石矿床围岩和矿石地球化学特征及成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 2021, 40(5): 923-938.
- Zhu Ligang, Jin Song, Wang Chulian, et al. Geochemistry Characteristic and Genesis of Surrounding Rock and Ore in Pucheng Fluorite Deposits District, Fujian Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2021, 40(5): 923-938.
- [10] 邹灏, 张寿庭, 方乙, 等. 中国萤石矿的研究现状及展望[J]. *国土资源科技管理*, 2012, 29(5): 35-42.
- Zou Hao, Zhang Shouting, Fang Yi, et al. Current Situation and Prospect of Fluorite Deposit Researches in China [J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2012, 29(5): 35-42.
- [11] Fang Y, Zou H, Bagas L, et al. Fluorite Deposits in the Zhejiang Province, Southeast China: The Possible Role of Extension During the Late Stages in the Subduction of the Paleo-Pacific Oceanic Plate, as Indicated by the Gudongkeng Fluorite Deposit [J/OL]. *Ore Geology Reviews*, 2020. doi: 10.1016/J.Oregeorev.2019.103276.
- [12] 吴益平, 张连昌, 袁波, 等. 新疆阿尔金地区卡尔恰尔超大型萤石矿床地质特征及成因[J]. *地球科学与环境学报*, 2021, 43(6): 962-977.
- Wu Yiping, Zhang Lianchang, Yuan Bo, et al. Geological Characteristics and Genesis of the Super-Large Kalqiar Fluorite Deposit in Altyn Tagh Area of Xinjiang, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(6): 962-977.
- [13] 成金华, 易佳慧, 吴巧生. 碳中和、战略性新兴产业发展与关键矿产资源管理[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(9): 135-142.
- Cheng Jinhua, Yi Jiahui, Wu Qiaosheng. Carbon Neutrality, Strategic Emerging Industry Development and Critical Mineral Management [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(9): 135-142.
- [14] 高永宝, 赵辛敏, 王博, 等. 阿尔金西段卡尔恰尔-库木塔什超大型萤石矿带矿床地质、控矿花岗岩特征及找矿远景[J/OL]. *中国地质*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20210913.1412.006.html>.
- Gao Yongbao, Zhao Xinmin, Wang Bo, et al. Geological Characteristics of Fluorite Deposits and Ore-controlling Granites, and Prospecting Potential of the Super-Large Kaerqiar-Kumutashi Fluorite Mineralization Belt in West Altyn-Tagh, China [J/OL]. *Geology in China*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20210913.1412.006.html>.
- [15] 游超, 王春连, 刘殿鹤, 等. 江西宁都坎田萤石矿床稀土元素地球化学特征及其指示意义[J]. *地球学报*, 2022, 43(3): 1-12.
- You Chao, Wang Chunlian, Liu Dianhe, et al. REE Geochemistry of Fluorite from Kantian Fluorite Deposit and Its Geological Implications in Ningdu Area, Jiangxi Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2022, 43(3): 1-12.
- [16] 文化川, 侯光仪. 江西永丰南坑萤石矿床地质特征控矿地质条件及成因[J]. *西南工学院学报*, 1993, 8(4):

- 55-63.
- Wen Huachuan, Hou Guangyi. The Geological Characteristics Controlled Geological Conditions and Genesis of Nankeng Fluorite Deposit in Yongfeng, Jiangxi Province[J]. Journal of Southwest Institute of Technology, 1993, 8(4):55-63.
- [17] 徐有华. 赣南萤石矿成矿地质条件及成矿预测研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
- Xu Youhua. Research on the Fluorite Metallogenic Geological Conditions and Prognosis in Gannan Area [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.
- [18] 杨瑞栋, 童日发, 邵伟江, 等. 赣南兴国旋卷构造区寻找富大矿床的思考[J]. 矿产勘查, 2013, 4(2): 121-130.
- Yang Ruidong, Tong Rifa, Shao Weijiang, et al. Potential for Exploring Large-Sized and High Grade Deposits in Xingguo Vortex Structure Area, Southern Jiangxi[J]. Mineral Exploration, 2013, 4(2):121-130.
- [19] 李灯平, 刘东杰, 马晓红. 江西省兴国县江背萤石矿地质特征及其找矿标志[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(4):420-426.
- Li Dengping, Liu Dongjie, Ma Xiaohong. Geological Characteristics and Prospecting Criteria of Fluorite Ore in Xinguo Country, Jiangxi Province[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 2015, 38(4):420-426.
- [20] 刘东杰, 李灯平, 吴素. 江西省兴国县江背萤石矿控矿特征及成因探讨[J]. 西部探矿工程, 2015, 27(11): 88-90.
- Liu Dongjie, Li Dengping, Wu Su. Ore Controlling Characteristics and Genesis of Jiangbei Fluorite Deposit in Xingguo County, Jiangxi Province [J]. West-China Exploration Engineering, 2015, 27(11): 88-90.
- [21] 庄贤贵, 彭琳琳, 刘庆鸿, 等. 江西石城楂山里萤石矿床地质特征及成因探讨[J]. 化工矿产地质, 2017, 39(2):65-71.
- Zhuang Xiangui, Peng Linlin, Liu Qinghong, et al. The Geological Characteristics and Genesis Discussion of Zhashanli Fluorite Deposit in Shicheng Country, Jiangxi Province[J]. Geology of Chemical Minerals, 2017, 39(2):65-71.
- [22] 鲍霖. 赣南地区萤石研究方向讨论[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(12):103-105.
- Bao Lin. Discussion on the Research Direction of Fluorite in Southern Jiangxi [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(12):103-105.
- [23] 方平, 张平艳, 肖兴, 等. 江西兴国县良村—高岭断裂带特征及黄蜡石矿的发现与意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(6):527-533.
- Fang Ping, Zhang Pingyan, Xiao Xing, et al. Characteristics of Liangcun-Gaoling Fault Zone in Xingguo County, Jiangxi Province and Discovery and Significance of Chrismatite Deposit[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2020, 43(6):527-533.
- [24] 侯珊珊, 杨锐. 江西兴国城岗矿区萤石矿地质特征及矿床成因探讨[J]. 化工矿产地质, 2016, 38(3):136-143.
- Hou Shanshan, Yang Rui. On the Geological Features and Genesis of Ore Deposits of Chenggang, Xinguo Jiangxi Province [J]. Geology of Chemical Minerals, 2016, 38(3):136-143.
- [25] 文化川, 汪建中. 南坑萤石矿床萤石包裹体特征及成因研究[J]. 矿物岩石, 1992, 12(3):74-79.
- Wen Huachuan, Wang Jianzhong. The Characteristic of Fluorite Inclusions and Genesis of Nankeng Fluorite Deposit [J]. Mineralogy and Petrology, 1992, 12(3):74-79.
- [26] Yang S W, Feng C Y, Lou F S, et al. Origin of the Tongda Fluorite Deposit Related to the Paleo-Pacific Plate Subduction in Southern Jiangxi Province, China: New Evidence from Geochronology, Geochemistry, Fluid Inclusion, and H-O Isotope Compositions[J]. Geological Journal, 2022, 57(1): 238-253.
- [27] 杨世文. 赣南兴国—宁都成矿带萤石矿床成因[D]. 北京: 中国地质科学院, 2019.
- Yang Shiwen. Genesis of Fluorite Deposits in Xingguo-Ningdu Metallogenic Belt, Southern Jiangxi [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2019.
- [28] Zhao K D, Jiang S Y, Dong C Y, et al. Uranium-Bearing and Barren Granites from the Taoshan Complex, Jiangxi Province, South China: Geochemical and Petrogenetic Discrimination and Exploration Significance[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, 110(2):126-135.
- [29] 崔圆圆, 赵志丹, 蒋婷, 等. 赣南早古生代晚期花岗岩类年代学、地球化学及岩石成因[J]. 岩石学报, 2013, 29(11):4011-4024.
- Cui Yuanyuan, Zhao Zhidan, Jiang Ting, et al.

- Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Early Paleozoic Granitoids in Southern Jiangxi Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(11):4011-4024.
- [30] 贺根文,周兴华,袁慧香,等. 赣南高陂花岗斑岩地球化学、年代学特征及其对成矿作用的启示[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(1):161-176.
- He Genwen, Zhou Xinghua, Yuan Huixiang, et al. Geochemistry and Geochronology of Early Cretaceous Granite Porphyry in Gaobei, South Jiangxi Province and Its Implications for Mineralization[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(1): 161-176.
- [31] 陈雷,闫臻,刘凯,等. 南秦岭冷水沟铜钼金矿床年代学及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(3):713-727.
- Chen Lei, Yan Zhen, Liu Kai, et al. Geochronology of Lengshuigou Cu-Mo-Au Deposit in the Shanyang-Zhashui Area of South Qinling and Its Geological Significance[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(3):713-727.
- [32] 杨世文,丰成友,楼法生,等. 赣南隆坪萤石矿床成矿时代及成因初探:来自萤石 Sm-Nd 测年及黑云母电子探针的证据[J]. *高校地质学报*, 2019, 25(3): 341-351.
- Yang Shiwen, Feng Chengyou, Lou Fasheng, et al. A Preliminary Study on Metallogenic Age and Genesis of Longping Fluorite Deposit in Southern Jiangxi Province: Evidence from Sm-Nd Isochron Dating of Fluorite and Electron Probe of Biotite[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2019, 25(3):341-351.
- [33] Yan H B, Ding X, Ling M X, et al. Three Late-Mesozoic Fluorite Deposit Belts in Southeast China and Links to Subduction of the (Paleo-) Pacific Plate [J/OL]. *Ore Geology Reviews*, 2020.doi:10.1016/J. Oregeorev.2020.103865.
- [34] Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature* [M]. San Francisco: W H Freeman, 1982: 1-460.
- [35] 成秋明. 极端地质事件定量模拟与预测[J]. *中国科学:地球科学*, 2022, 52(6):975-991.
- Cheng Qiuming. Quantitative Simulation and Prediction of Extreme Geological Events[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2022, 52(6):975-991.
- [36] 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.
- [37] Cheng Q M, Agterberg F P, Bonham-Carter G F. A Spatial Analysis Method for Geochemical Anomaly Separation[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1996, 56(3): 183-195.
- [38] Cheng Q M. Mapping Singularities with Stream Sediment Geochemical Data for Prediction of Undiscovered Mineral Deposits in Gejiu, Yunnan Province, China[J]. *Ore Geology Review*, 2007, 32: 314-324.
- [39] 韩喜彬,李家彪,冯佐海,等. 云开隆起西、北缘金银矿床的空间分形特征[J]. *桂林理工大学学报*, 2010, 30(1): 15-20.
- Han Xibin, Li Jiabiao, Feng Zuohai, et al. Spatial Fractal Characteristics of Gold-Silver Deposits in the Western and Northern Yunkai Uplift[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2010, 30(1):15-20.
- [40] Zuo R G. Identifying Geochemical Anomalies Associated with Cu and Pb-Zn Skarn Mineralization Using Principal Component Analysis and Spectrum-Area Fractal Modeling in the Gangdese Belt, Tibet (China) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 111(1): 13-22.
- [41] Sun X, Zheng Y Y, Wang C M, et al. Identifying Geochemical Anomalies Associated with Sb-Au-Pb-Zn-Ag Mineralization in North Himalaya, Southern Tibet [J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 73: 1-12.
- [42] 成秋明. 非线性成矿预测理论:多重分形奇异性-广义自相似性-分形谱系模型与方法[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 2006, 31(3): 337-348.
- Cheng Qiuming. Singularity-Generalized Self-Similarity-Fractal Spectrum (3S) Models[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2006, 31(3): 337-348.
- [43] 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.
- Cheng Qiuming. Singular Mineralization Processes and Mineral Resources Quantitative Prediction: New Theories and Methods[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 42-53.
- [44] 成秋明. 什么是数学地球科学及其前沿领域? [J]. *地学前缘*, 2021, 28(3): 6-25.
- Cheng Qiuming. What Are Mathematical Geosciences and Its Frontiers? [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(3): 6-25.

- [45] 崔中良,刘祥云,周家喜.川滇黔接壤铅锌矿集区断裂构造分形特征及其地质意义[J].世界地质,2021,40(1):75-92.
- Cui Zhongliang, Liu Xiangyun, Zhou Jiayi. Fractal Characteristics of Faults and Its Geological Significance in Sichuan-Yunnan-Guizhou Pb - Zn Metallogenic Province, China [J]. Global Geology, 2021, 40(1): 75 - 92.
- [46] 崔中良,姚艳领,程金华,等.黔西北垭都—蟒硐成矿带构造分形结构特征及找矿意义[J].高校地质学报,2022,28(4):592-605.
- Cui Zhongliang, Yao Yanling, Cheng Jinhua, et al. Structural Fractal Texture Characteristics and Its Prospecting Significance for the Yadu-Mangdong Metallogenic Belt in NW Guizhou Province [J]. Geological Journal of China Universities, 2022, 28 (4): 592 - 605.
- [47] 崔中良,孔德坤.河南熊耳山矿集区及其邻区分形特征与找矿方向探讨[J].化工矿物与加工,2021,50(11):1-7.
- Cui Zhongliang, Kong Dekun. Fractal Characteristics and Range of Reconnaissance in Xiong'er Mountain Ore-Concentrated Area and Its Vicinity, Henan Province [J]. Industrial Minerals and Processing, 2021, 50(11): 1 - 7 .
- [48] 万丽,刘慧,曾祥健.普朗斑岩型铜矿床成矿元素多重分形特征及其矿化强度指示[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(4):1054-1063.
- Wan Li, Liu Hui, Zeng Xiangjian. Multifractal Characteristics of Metallogenic Elements and Their Implications to the Mineralization Intensity in Pulang Porphyry Copper Deposit [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51 (4): 1054 - 1063.
- [49] 李柱,张德会.内蒙古维拉斯托锡多金属矿石英脉形态分带定量分析[J].西北地质,2021,54(3):121-130.
- Li Zhu, Zhang Dehui. Quantitative Analysis of Morphological Zonations of Quartz Veins in Weilasituo Sn-Polymetallic Deposit, Inner Mongolia [J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3): 121 - 130.
- [50] Li X B, Wei W, Wang L, et al. A New Method for Evaluating the Pore Structure Complexity of Digital Rocks Based on the Relative Value of Fractal Dimension[J/OL]. Marine and Petroleum Geology, 2022.doi:10.1016/j.marpetgeo.2022.105694.
- [51] 岳亮,孟庆强,刘自亮,等.致密砂岩储层物性及非均质性特征:以四川盆地中部广安地区上三叠统须家河组六段为例[J].石油与天然气地质,2022,43(3):597-609.
- Yue Liang, Meng Qingqiang, Liu Ziliang, et al. Physical Property and Heterogeneity of Tight Sandstone Reservoirs: A Case of the Upper Triassic 6th Member of Xujiahe Formation, Guang'an, Central Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 597 - 609.
- [52] 秦耀辰,刘凯.分形理论在地理学中的应用研究进展[J].地理科学进展,2003,22(4):426-436.
- Qin Yaochen, Liu Kai. Advancement of Applied Studies of Fractal Theory in Geography [J]. Progress in Geography, 2003, 22(4): 426 - 436.
- [53] He H, An L, Liu W, et al. Fractal Characteristics of Fault Systems and Their Geological Significance in the Hutouya Poly-Metallic Ore Field of Qimantage, East Kunlun, China [J]. Geological Journal, 2017, 52 (Sup.1): 419 - 424.
- [54] Wang N, Liu Y S, Peng N, et al. Fractal Characteristics of Fault Structures and Their Use for Mapping Ore-Prospecting Potential in the Qitianling Area, Southern Hunan Province, China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2015, 89 (1): 121 - 132.
- [55] 卢新卫,马东升.湘中锑矿带断裂体系分维及其对成矿流体运移和矿床定位的指示作用[J].矿床地质,1999,18(2):168-174.
- Lu Xinwei, Ma Dongsheng. Fractal Dimensions of Fracture Systems in Antimony Metallogenic Zones of Central Hunan and Their Indicating Significance for Migration of Ore-Forming Fluids and Location of Ore Deposits [J]. Mineral Deposits, 1999, 18 (2): 168 - 174.
- [56] 谢焱石,谭凯旋.断裂构造的分形研究及其地质应用[J].地质地球化学,2002,30(1):71-77.
- Xie Yanshi, Tan Kaixuan. Fractal Research on Fracture Structures and Application in Geology [J]. Geology-Geochemistry, 2002, 30(1): 71 - 77.
- [57] 廖家飞,冯佐海,罗畅权,等.广西贺州水岩坝矿田断裂构造分形特征分析[J].矿床地质,2012,31(3):459-464.
- Liao Jiafei, Feng Zuohai, Luo Changquan, et al. Fractal Characteristics Analysis of Fractures in Shuiyanba Ore Field of Hezhou, Guangxi [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(3): 459 - 464.
- [58] 李飞,刘国生,周庆卫,等.分形理论在断裂与矿产

关系研究中的应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(5): 701-706.

Li Fei, Liu Guosheng, Zhou Qingwei, et al. Application of Fractal Theory in the Study of the Relationship Between Fracture and Mineral [J]. Journal of Hefei University of Technology (Science and Technology Edition), 2016, 39(5): 701-706.

[59] 蒋超, 李社宏, 付嵩, 等. 广西大瑶山西北地区构造分形与成矿预测[J]. 地球学报, 2021, 42(4): 514-526.

Jiang Chao, Li Shehong, Fu Song, et al. Tectonic Fractal and Metallogenic Prediction in Northwest Dayao Mountain, Guangxi [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(4): 514-526.

[60] 谢焱石, 尹建文, 谭凯旋, 等. 华南地区构造-岩浆活化与热液铀成矿的分形动力学[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(3): 510-519.

Xie Yanshi, Yin Jianwen, Tan Kaixuan, et al. Tectono-Magmatic Activization and Fractal Dynamics of Hydrothermal Uranium Ore Formation in South China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2015, 39(3): 510-519.

[61] Kruhl J H. Fractals and Dynamic Systems in Geoscience [M]. New York: Springer-Verlag, 1994: 1-421.

[62] 胡修权, 施泽进, 田亚铭, 等. 川东南地区茅口组断裂多重分形特征及意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(4): 476-482.

Hu Xiuquan, Shi Zejin, Tian Yaming, et al. Multifractal Feature and Significance of Maokou Formation Fault in the Southeast of Sichuan [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2014, 41(4): 476-482.

[63] 李长江, 麻土华, 朱兴盛. 矿产勘查中的分形、混沌与 ANN [M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1-132.

Li Changjiang, Ma Tuhua, Zhu Xingsheng. Fractal, Chaos and ANN in Mineral Exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1-132.