

西秦岭夏河-合作地区断裂构造分形结构特征 及成矿预测*

张元¹, 王红岩^{1**}, 李育¹, 杨剑¹, 胡杨², 李永恒², 李彩霞², 任涛²

(1 昆明理工大学, 云南昆明 650093; 2 甘肃省地质矿产勘查开发局第三地质矿产勘查院, 甘肃兰州 730050)

摘要 西秦岭夏河-合作地区是中国重要的金矿及多金属矿床开发地带, 区内断裂构造复杂, 构造控矿作用显著。文章利用分形理论方法对夏河-合作地区不同方向断裂构造作定量分析, 统计计算断裂构造容量维和信息维, 结合矿床空间分布分形特征和矿床 Fry 分析, 探讨研究区构造分形特征及断裂与矿床的空间展布关系。研究表明, 研究区全部断裂容量维 1.2374, 北东向断裂容量维 0.8229, 北西向断裂容量维 1.2296, 近东西向断裂容量维 1.0312, 全部断裂容量和北西向断裂容量维处于断裂分形临界值(1.22~1.38)区域, 显示研究区断裂构造连通性较好。研究区全部断裂信息维 1.1118, 北东向断裂信息维 1.018, 北西向断裂信息维 1.2296, 近东西向断裂信息维 1.0217, 北西向断裂信息维处于断裂分形临界值区域, 反映北西向对矿床的控制最强。断裂构造分形维数可以表征矿床的沉积部位, 以容量维、信息维等值线图以及 Fry 图划分出 3 个有利成矿区。

关键词 分形维数; Fry 分析; 断裂构造; 金矿分布; 西秦岭夏河-合作地区

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Fractal structural characteristics of fault structures and metallogenic prediction in Xiahe-Hezuo region of West Qinling Mountains

ZHANG Yuan¹, WANG HongYan¹, LI Yu¹, YANG Jian¹, HU Yang², LI YongHeng², LI CaiXia² and REN Tao²
(1 Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 2 The Third Institute of Geology and Mineral Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract

The Xiahe-Hezuo area in the West Qinling Mountains is an important mining area for gold and polymetallic deposits in China, with complex fault structures and significant structural ore control. In this paper, the fractal theory method is used to quantitatively analyze the fracture structure in different directions in the Xiahe-Hezuo area, statistically calculate the fracture structure capacity and information dimension, combining with the fractal characteristics of the spatial distribution of the deposit and the Fry analysis of the deposit, the fractal characteristics of the structure of the study area and the spatial distribution relationship between the fracture and the deposit are discussed. The results show that the total fracture capacity dimension of the study area is 1.2374, the north-east fracture capacity dimension is 0.8229, the north-west fracture capacity dimension is 1.2296, and the near-east-west fracture capacity dimension is 1.0312, and the total fracture capacity and the north-west fracture capacity dimension are in the fracture fractal critical value (1.22~1.38) region, indicating that the fracture tectonic connectivity of the study area is good. The information dimension of all faults in the study area is 1.1118, the information di-

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号:42072094、42162012)和校企合作项目(编号:2023FW62)联合资助

第一作者简介 张元,男,1995年生,硕士研究生,构造地质学专业。Email:1441547316@qq.com

** 通讯作者 王红岩,女,1978年生,硕士,讲师,主要从事地理信息系统教学和科研工作。Email:644202577@qq.com

收稿日期 2023-07-04; 改回日期 2024-01-21。秦思婷编辑。

mension of the north-east fault is 1.018, the information dimension of the north-west fault is 1.2296, the information dimension of the near-east-west fault is 1.0217, and the information dimension of the north-west fault is in the fracture fractal critical value area, reflecting the strongest control of the deposit in the north-west direction. Fracture structure fractal dimension can be used to characterize the sedimentary site of the ore, and three favorable mineralization areas are identified by capacity dimension, information dimension contour map and Fry diagram.

Key words: fractal dimension, Fry analysis, fault structure, gold distribution, Xiahe-Hezuo area in West Qinling mountains

分形理论是指具有自相似性的现象、图像或者物理过程(如羊齿植物、菜花、海岸线),由美籍数学家曼德尔布罗特于1975年描述碎石过程中创造出,认为局部是整体的比例缩小图像(Mandelbrot et al., 1967;1991)。对于无法用欧几里得和微积分刻画的自然界分形客体,分形理论能揭示其规律性、层次性、自相似性和标度不变性(孙文洁,2022)。近几十年,分形理论在多学科多领域得到广泛应用,特别是在地质学领域涌现大量研究成果,成矿预测(王喜生等,2000;赵少攀,2015;李飞,2016;王维,2016;孙涛等,2017;2018;崔中良,2022;Cui et al., 2022)、矿床品位分布(万丽等,2007;谢焱石等,2010)、断裂构造特征(廖家飞等,2012;崔中良,2021)、储层孔隙结构(李昊远等,2023;Gu et al., 2023)等为分形理论打下坚实的理论基础。

断裂构造是某次地质运动过程中地层错动产生位移的地质现象,在空间形态上呈现一系列不规则线状或面状分形集合体,同海岸线一样,断裂构造具有自相似性(谢和平,1994)。分形理论研究方法将断裂构造研究从定性研究阶段提升到定量研究阶段(朱剑兵等,2005)。前人研究表明,断裂构造分形维数能反映断裂发育的复杂程度,有效表征断裂发育特征,分形维数越大,断裂构造越发育(范存辉等,2017)。有学者通过岩石块体二轴压缩试验测得断裂构造分形维数临界值为1.22~1.38(Kruhl, 1994),该临界值可以评价断裂系统连通性,断裂分形值低于临界值则表明断裂连通性较差,断裂孤立,分形值处于或高于临界值,则断裂连通性好,有利于成矿流体的迁移、聚集和赋存(卢新卫等,1999;谢焱石,2010)。因此,区域断裂构造分形维数值能定量表征断裂构造发育程度,有效阐明断裂构造对成矿流体的控制作用。

西秦岭成矿带是中国重要的多金属成矿带,已发现矿产44种,矿产地675处(姜寒冰等,2023)。西

秦岭这种成矿优越性吸引着大量学者,在其矿产资源评价、成矿系列以及找矿预测方面做了大量研究工作(李康宁等,2020;何进忠等,2023;王雷等,2023)。位于西秦岭中部的夏河-合作地区地质构造复杂,成矿地质条件优越,矿床呈现“北西成带,北东成串”的特征(李康宁等,2020),其中的金矿床最为发育,早子沟、加甘滩、以地南等大型-特大型金矿极具代表性。区内年代学、矿床成因、找矿预测等方面针对单个矿床做了大量研究工作(Jin et al., 2017; Yu et al., 2019; Du et al., 2021; 第鹏飞等, 2021; Yu et al., 2022),但未见使用分形理论方法定量评价断裂构造与矿床空间分布规律的相关报道。文章以夏河-合作地区断裂构造和矿床分布特征为研究对象,定量研究区内断裂构造分形维数与矿床空间分布的关系,结合Fry分析法,以期为该区成矿预测提供理论依据。

1 地质背景

夏河-合作地区位于青藏高原东北缘,隶属于秦岭弧盆系,北接中祁连地块,南邻若尔盖古陆,处于古亚洲构造域、特提斯构造域和滨太平洋构造域复合叠加的构造部位(图1a、b,张国伟等,2004;路英川,2016)。海西期地质运动造成地层逐步拉张裂隙,以及印支期的强烈挤压造山(姜寒冰,2023),造成区域构造线呈北西-南东向展布,褶皱、断裂发育,地质构造复杂,区域成矿条件优越。

区域出露地层主要有二叠系和三叠系。其中,二叠系分布于区内东北部,呈北西向-南东向展布,与三叠系果木沟组呈断层接触,主要为上二叠统石关组二段及石关组三段;三叠系在区内呈北西向-南东向展布,与区域构造线方向一致,区内出露下三叠统果木沟组和江里沟组,为区内主要的金矿赋矿地层。

区域上主体褶皱为新堡-力士山复背斜,地层强烈变形,次级尖棱褶皱、倒转褶皱及层间板、劈理十

分发育(韦良喜,2018)。背斜的核部和向斜的两翼有较多的石英脉、方解石脉及花岗闪长岩脉侵入。区域断裂构造普遍发育,已发现的金矿床和金矿(化)点的区域性展布严格受北西向断裂带及其次级断裂的控制,控矿断裂主要为夏河-合作断裂带和桑科南-格里那断裂带,2个断裂之间发育4条北西向次级主干断裂,由北向南分别是麦来梁-早仁道、扎油梁-早子沟、桑曲-地娄塘、索拉贡玛-加甘滩压性、压扭性逆冲断裂,断层延长35~50 km,平面上呈舒缓波状展布,倾向北东,倾角45°~70°。在北西向主干断裂带上局部发育北东向、近南北向断裂,断层规模较小,延长0.5~2.0 km,沿断裂带有岩脉、石英脉等充填,与成矿关系十分密切,如早子沟金矿的主矿体就产于北东、北西、近南北向断裂破碎带中。区域性深大断裂带主要起导矿的作用,其次级断裂为主要的容矿构造。

区域岩浆活动较频繁,侵入岩普遍发育,主要有桑曲、马九勒花岗闪长岩,将其那梁、塔日干、早仁道石英闪长岩,杂恰勒布、扎油梁英云闪长斑岩等规模较大的侵入体及各种岩脉(梁志录,2016)。侏罗纪岩浆活动与金矿的就位关系密切(刘春先等,2018)。

2 断裂构造分形维数特征

2.1 容量维 D_0

2.1.1 断裂构造容量维特征

断裂构造在空间展布上呈无规则而复杂的线状或面状形态,整体呈自相似性,可用分形维数对其描述(姜颜良,2023)。分形维数存在多种计算方法,如盒计维数、滑动窗格-模型、P-A(周长-面积)模型、N-A(数量-面积)模型等,因盒计维数法简单便捷,使用

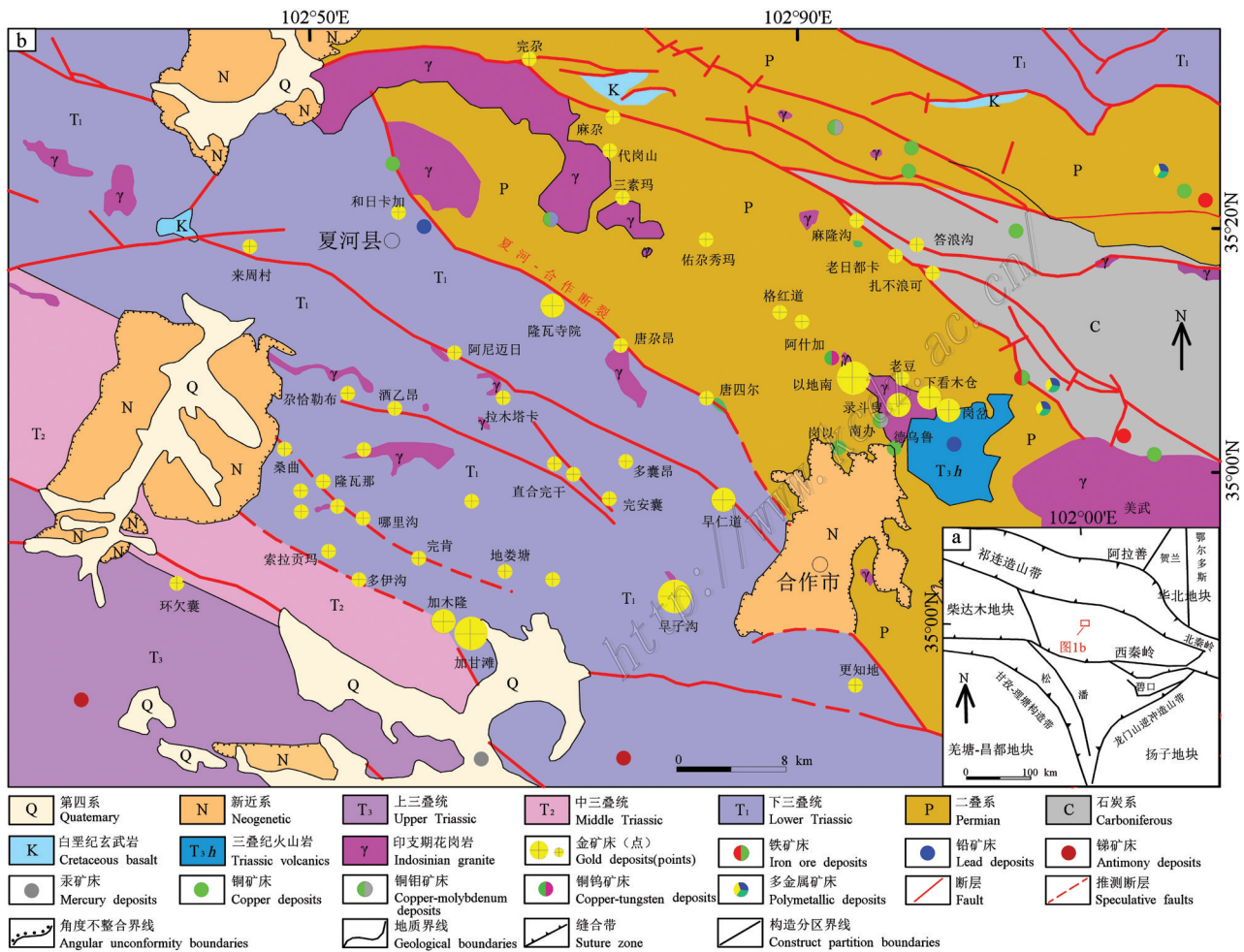


图 1 夏河-合作地区大地构造位置简图(a,据李康宁,2020修改)和区域地质简图(b,据韦良喜,2018修改)

Fig. 1 Schematic map showing tectonic location (a, modified from Li et al., 2020) and simplified regional geologic map (b, modified from Wei et al., 2018) of the Xiahe-Hezuo area

该方法对研究区断裂构造系统进行维数计算,从而分析研究区断裂构造的变化规律及其对矿床的控制作用,运算过程如下:采用不同边长为 r 的二维正方形网格依次覆盖研究区,统计不同边长为 r 的网格下包含断裂的正方形数目 $N(r)$, $N(r)$ 和 r 存在以下幂定律关系(谢焱石,2002):

$$N(r)=Cr-D_0 \quad (1)$$

其中, $N(r)$ 为包含断裂构造且边长为 r 的正方形盒子数, C 为常数, D_0 为计盒维数。式(1)两边分别取对数,得到

$$\ln N(r)=-D_0 \ln r+\ln C \quad (2)$$

通过式(2),以 $\ln N(r)$ 为纵坐标, $\ln r$ 为横坐标,建立二维坐标系,使用excel工具对数据进行最小二乘法拟合,所得直线斜率代表计盒维数 D_0 。

在实际计算过程中,分别以 r 为50 mm(实际距离11.1111 km)、25 mm(实际距离5.5555 km)、12.5 mm

(实际距离2.7777 km)、6.25 mm(实际距离1.3888 km)、3.125 mm(实际距离0.6944 km)的正方形网格覆盖研究区(图2),并分别统计包含全部断裂、北西向断裂、北东向断裂以及近东西向断裂的正方形网格数,最后做线性回归,计算出断裂构造分维值和判定系数平方(R^2)。统计及计算结果见表1, $\ln N(r)-\ln r$ 最小二乘拟合直线见图3。

夏河-合作地区总体断裂构造分形维数为1.2374,处于能反映断裂系统连通性的临界值1.22~1.38区(图3),表明研究区断裂构造系统连通性较好,有利于成矿流体的迁移、聚集和成矿。判定系数平方(R^2)能反映分形分维特征的优良性(孙文洁,2022),全区断裂构造判定系数平方(R^2)为0.9952,大于0.99,表明研究区具备良好的分形分维特征。区内共发育3个方向的断裂构造,发育程度各不相同。其中,北西向断裂构造最为发育,全区皆有出

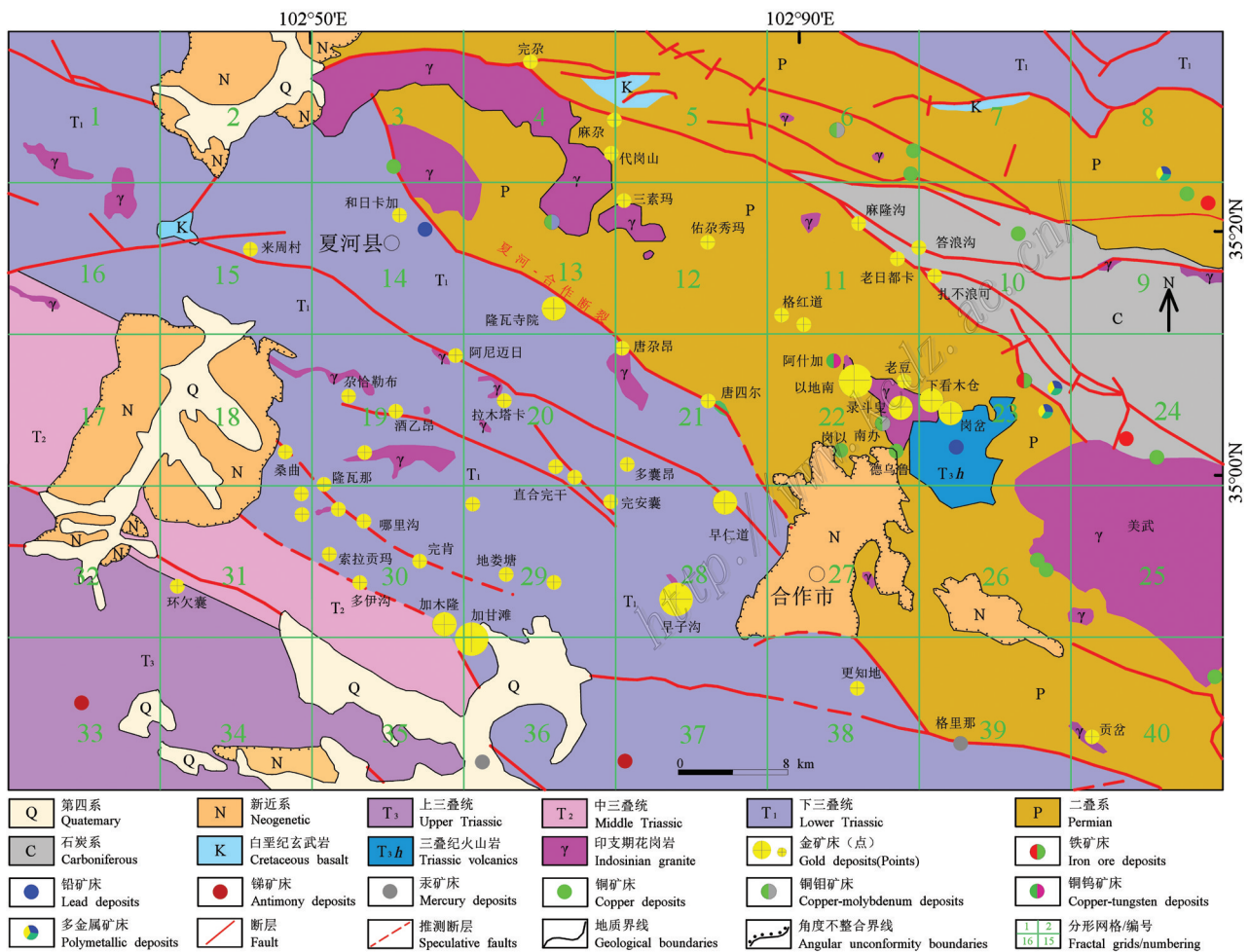


图2 夏河-合作地区断裂构造分形网格图(取网格边长 $r=50$ mm为例)

Fig. 2 Fractal grid diagram of fault structure in the Xiahe- Hezuo area (take grid side length $r=50$ mm as an example)

表 1 夏河-合作地区断裂构造容量维计算结果

Table 1 Calculation results of fault structure capacity dimension in the Xiahe-Hezuo area

| 断裂类型 | 容量维 | | | | 断裂类型 | 容量维 | | | |
|----------|---------|------|---------|--------|---------|---------|------|---------|--------|
| | r/km | N(r) | lnr | lnN(r) | | r/km | N(r) | lnr | lnN(r) |
| 总体断裂构造 | 11.1111 | 32 | 1.0457 | 1.5051 | 北东向断裂构造 | 11.1111 | 9 | 1.0457 | 0.9542 |
| | 5.5555 | 87 | 0.7447 | 1.9395 | | 5.5555 | 16 | 0.7447 | 1.2041 |
| | 2.7777 | 218 | 0.4437 | 2.3384 | | 2.7777 | 25 | 0.4437 | 1.3979 |
| | 1.3888 | 486 | 0.1426 | 2.6866 | | 1.3888 | 48 | 0.1426 | 1.6812 |
| | 0.6944 | 988 | -0.1584 | 2.9940 | | 0.6944 | 90 | -0.1584 | 1.9542 |
| 近东西向断裂构造 | 11.1111 | 10 | 1.0457 | 1.0000 | 北西向断裂构造 | 11.1111 | 24 | 1.0457 | 1.3802 |
| | 5.5555 | 18 | 0.7447 | 1.2552 | | 5.5555 | 64 | 0.7447 | 1.8061 |
| | 2.7777 | 40 | 0.4437 | 1.6020 | | 2.7777 | 236 | 0.4437 | 2.2148 |
| | 1.3888 | 83 | 0.1426 | 1.9191 | | 1.3888 | 487 | 0.1426 | 2.5378 |
| | 0.6944 | 166 | -0.1584 | 2.2201 | | 0.6944 | 756 | -0.1584 | 2.8785 |

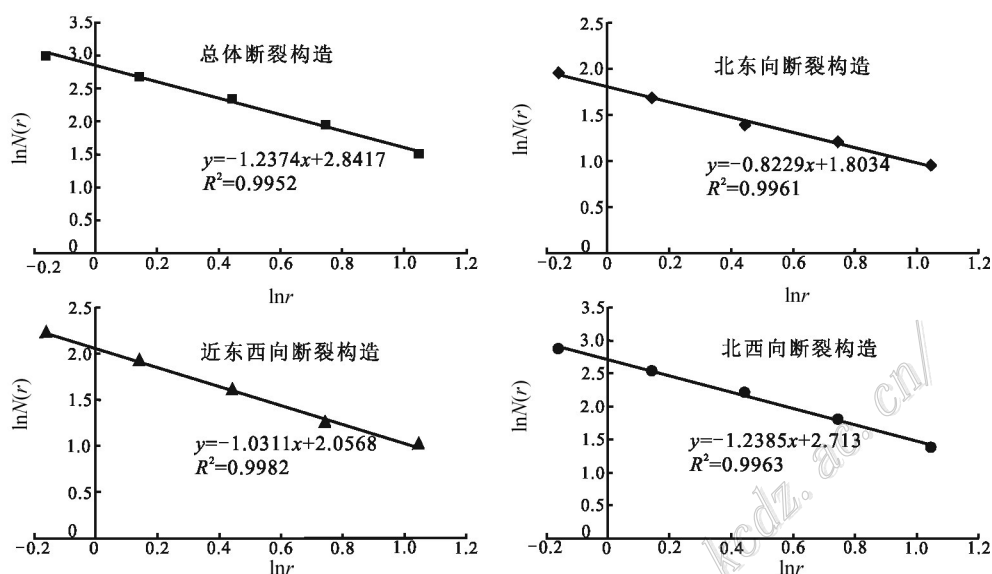


图 3 夏河-合作地区断裂构造容量维 $\ln N(r)$ - $\ln r$ 拟合直线图

Fig. 3 Fitted straight line diagram of the fracture structure capacity dimension $\ln N(r)$ - $\ln r$ in the Xiahe-Hezuo area

露,分形维数为 1.2385,相关系数 0.9963,断裂连通性较好,有利于矿液迁移聚集,完尕-扎不浪可、和日卡加-唐四尔、来周村-早仁道、桑曲-完肯、尕恰勒布-完安囊等沿线矿床均沿北西向-南东向断裂分布;北东向断裂构造发育较少,主要出露于研究区北东地界,分形维数 0.8229,判定系数 0.9961,对北西向断裂相互联通起重要作用;近东西向断裂构造主要分布于研究区北东侧,少部分近东西向断裂是部分北西向断裂的延伸转向,分形维数 1.0312,判定系数 0.9982,对矿床的控制较差。

2.1.2 分区容量维特征

分区容量维计算过程如下:以 $r=50$ mm(实际距

离 11.1111 km)的正方形网格覆盖研究区,将研究区平均分成 40 个子网格,将各子网格依次编号(图 2)。采取计算容量维的相同研究标度去计算分区容量维,即用 25 mm(实际距离 5.5555 km)、12.5 mm(实际距离 2.7777 km)、6.25 mm(实际距离 1.3888 km)、3.125 mm(实际距离 0.6944 km)的正方形网格覆盖研究分区子网格,统计各标度范围内子网格中包含断裂的网格数 $N(r)$ 。同样的计算 $\ln r$ 与 $\ln N(r)$,并做线性回归计算出分形维数和判定系数(R^2)。

统计计算结果显示,除去未包含断裂构造的子网格,分形维数最小值为 0.6584,最大值为 1.6051(表 2)。判定系数最小值为 0.9561,最大值 0.9995,普遍

高于0.99,拟合度都比较高,具良好的分形维数特征。

2.2 信息维D₁

2.2.1 断裂构造信息维特征

信息维的研究方法与容量维类似,不过考虑的重点是出现在某一网格中的断裂数目(概率),也称断裂强度。某一标度为*r*的正方形网格将断裂构造分割成*N(r)*份,断裂构造出现在第*i*个网格中的概率为*P_i(r)*,计算公式为式(3),信息量则为*I(r)*,计算公式为式(4)(谢焱石,2002;崔中良,2022)。

$$P_i(r) = \frac{ni}{\sum_{i=1}^{N(r)} ni} \quad (3)$$

$$I(r) = -\sum_{i=1}^{N(r)} P_i(r) \ln P_i(r) \quad (4)$$

在计算过程中,改变正方形网格边长*r*值,若*I(r)*与ln*r*存在下列线性关系:

$$I(r) = -D_1 \ln r + I_0 \quad (5)$$

则可根据线性回归求出直线斜率即为信息维。

在实际计算过程中,同样采取与容量维计算尺

度相同的正方形网格覆盖研究区,正方形边长*r*为50 mm(实际距离11.1111 km)、25 mm(实际距离5.5555 km)、12.5 mm(实际距离2.7777 km)、6.25 mm(实际距离1.3888 km)、3.125 mm(实际距离0.6944 km)。分别计算出研究区总体断裂、北东向断裂、北西向断裂以及近东西向断裂的信息量*I(r)*,统计数据见表3,利用excel工具作*I(r)*-ln*r*线性回归图(图4),根据直线斜率得出信息维D₁。

计算结果显示,全区断裂构造信息维1.1118,判定系数0.9894,北东向断裂构造信息维1.018,判定系数0.9796,近东西向断裂构造信息维1.0217,判定系数0.9809,北西向断裂构造信息维1.2296,判定系数0.9917。北西向断裂信息维和判定系数最高,表明北西向断裂最为复杂且具有较强的相似性,该方向的断裂也是主要的控矿断裂,这与研究区以北西向断裂最为发育,且矿床沿断裂成带分布相吻合。

2.2.2 分区断裂构造信息维特征

信息维的分区计算标度与容量维标度相同,同样以边长*r*为50 mm(实际距离11.1111 km)的正方

表2 夏河-合作地区断裂构造分区容量维计算参数统计表

Table 2 Statistical table of calculation parameters of the capacity dimension of fault structure subarea in the Xiahe-Hezuo area

| 编号 | 尺度/km | | | | 分形维数 | 判定系数 (R ²) | 编号 | 尺度/km | | | | 分形维数 | 判定系数 (R ²) |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------|----|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------|
| | 5.5555 | 2.7777 | 1.3888 | 0.6944 | | | | 5.5555 | 2.7777 | 1.3888 | 0.6944 | | |
| 1 | 2 | 5 | 11 | 25 | 1.2069 | 0.9990 | 21 | 4 | 8 | 15 | 38 | 1.6051 | 0.9925 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0000 | 1.0000 | 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0000 | 1.0000 |
| 3 | 4 | 8 | 13 | 27 | 0.8962 | 0.9946 | 23 | 1 | 5 | 13 | 24 | 1.5134 | 0.9561 |
| 4 | 3 | 8 | 20 | 30 | 1.1288 | 0.9706 | 24 | 3 | 7 | 17 | 34 | 1.1787 | 0.9974 |
| 5 | 4 | 13 | 31 | 55 | 1.2598 | 0.9766 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0000 | 1.0000 |
| 6 | 4 | 15 | 30 | 52 | 1.2102 | 0.9564 | 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0000 | 1.0000 |
| 7 | 4 | 8 | 21 | 39 | 1.1249 | 0.9933 | 27 | 2 | 4 | 8 | 15 | 0.9721 | 0.9995 |
| 8 | 3 | 8 | 15 | 37 | 1.1781 | 0.9937 | 28 | 1 | 3 | 4 | 12 | 1.1169 | 0.9580 |
| 9 | 4 | 8 | 20 | 31 | 1.0185 | 0.9839 | 29 | 2 | 3 | 7 | 14 | 0.9643 | 0.9831 |
| 10 | 4 | 16 | 35 | 73 | 1.3699 | 0.9738 | 30 | 4 | 9 | 14 | 34 | 0.9900 | 0.9855 |
| 11 | 3 | 6 | 13 | 28 | 1.0782 | 0.9994 | 31 | 3 | 8 | 12 | 25 | 0.9762 | 0.9761 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0000 | 1.0000 | 32 | 1 | 2 | 3 | 4 | 0.6584 | 0.9608 |
| 13 | 3 | 6 | 10 | 16 | 0.7982 | 0.9913 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0000 | 1.0000 |
| 14 | 3 | 6 | 13 | 25 | 1.0292 | 0.9991 | 34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0000 | 1.0000 |
| 15 | 3 | 7 | 16 | 27 | 1.0702 | 0.9891 | 35 | 4 | 7 | 13 | 24 | 0.8949 | 0.9995 |
| 16 | 3 | 7 | 13 | 28 | 1.0560 | 0.9968 | 36 | 3 | 5 | 8 | 16 | 0.7923 | 0.9922 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0000 | 1.0000 | 37 | 1 | 4 | 9 | 18 | 1.3679 | 0.9718 |
| 18 | 1 | 2 | 5 | 6 | 0.9076 | 0.9469 | 38 | 3 | 6 | 14 | 27 | 1.0732 | 0.9977 |
| 19 | 4 | 7 | 11 | 21 | 0.7830 | 0.9956 | 39 | 2 | 4 | 9 | 17 | 1.0432 | 0.9981 |
| 20 | 4 | 9 | 23 | 44 | 1.1732 | 0.9954 | 40 | 4 | 8 | 19 | 38 | 1.4991 | 0.9730 |

表 3 夏河-合作地区断裂构造信息维统计参数表

Table 3 Statistical parameters of fault structure information dimension in the Xiahe-Hezuo area

| 断裂类型 | 信息维 | | | 断裂类型 | 信息维 | | |
|----------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|
| | r/km | lnr | I(r) | | r/km | lnr | I(r) |
| 总体断裂构造 | 11.1111 | 1.0457 | 1.7298 | 北东向断裂构造 | 11.1111 | 1.0457 | 0.7148 |
| | 5.5555 | 0.7447 | 1.9254 | | 5.5555 | 0.7447 | 1.1952 |
| | 2.7777 | 0.4437 | 2.3283 | | 2.7777 | 0.4437 | 1.4675 |
| | 1.3888 | 0.1426 | 2.7189 | | 1.3888 | 0.1426 | 1.7160 |
| | 0.6944 | -0.1584 | 3.0064 | | 0.6944 | -0.1584 | 1.9867 |
| 近东西向断裂构造 | 11.1111 | 1.0457 | 0.9148 | 北西向断裂构造 | 11.1111 | 1.0457 | 1.4235 |
| | 5.5555 | 0.7447 | 1.2499 | | 5.5555 | 0.7447 | 1.9028 |
| | 2.7777 | 0.4437 | 1.5323 | | 2.7777 | 0.4437 | 2.2787 |
| | 1.3888 | 0.1426 | 1.9690 | | 1.3888 | 0.1426 | 2.6149 |
| | 0.6944 | -0.1584 | 2.0930 | | 0.6944 | -0.1584 | 2.9182 |

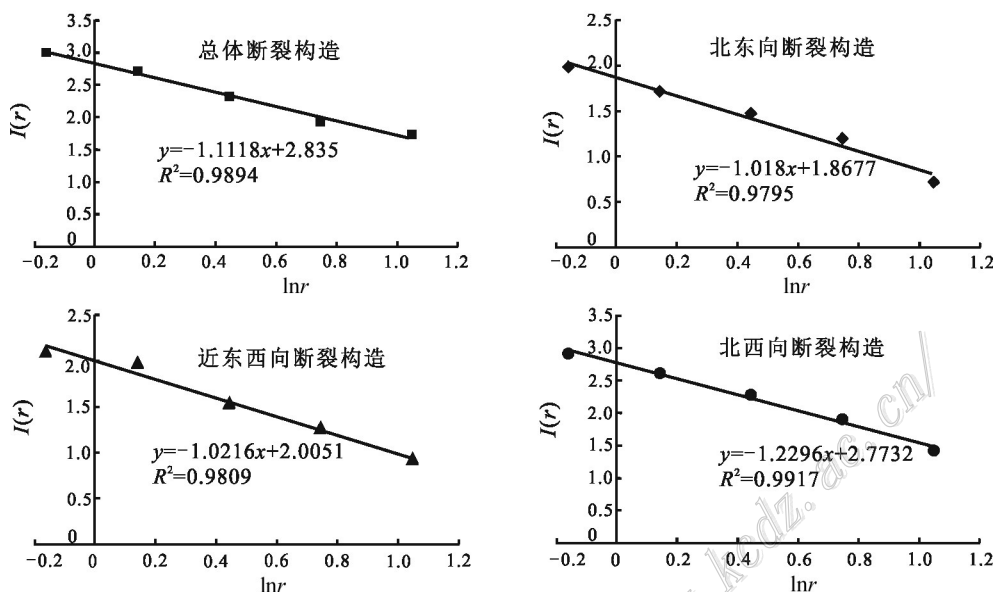


图 4 夏河-合作地区断裂构造信息维 I(r)-lnr 拟合直线图

Fig. 4 Fitting straight line diagram of fault structure information dimension I(r)-lnr in the Xiahe-Hezuo area

形覆盖研究区,共划分成 40 个子区,用 25 mm(实际距离 5.5555 km)、12.5 mm(实际距离 2.7777 km)、6.25 mm(实际距离 1.3888 km)、3.125 mm(实际距离 0.6944 km)标度的正方形网格覆盖子区,用前面计算信息维的方法计算出分区信息维,这部分不再赘述。统计计算结果见表 4,2、12 等 8 个断裂空白分区未被统计,分区信息维 0.5341~1.5817,平均值 1.1081,且分区判定系数(R²)多数大于 0.99,分区拟合度都较高,断裂有较强的统计自相似性。

2.3 矿床的分形特征

2.3.1 矿床空间分布分形结构特征

三叠纪以来的印支运动使夏河-合作地区构

造、岩浆活动强烈,各类矿产大量产出(李康宁等, 2020),矿床成因类型主要为岩浆热液型和矽卡岩型。在分析矿床的空间分布分形特征过程中,将同一成因类型、成矿时代的矿床归为一组,分别计算其分维数。用边长 r 为 50 mm(实际距离 11.1111 km)、25 mm(实际距离 5.5555 km)、12.5 mm(实际距离 2.7777 km)、6.25 mm(实际距离 1.3888 km)的正方形网格覆盖研究区,分别统计包含同一成因类型、成矿时代的矿床出露点的网格数 N(r),分形维数计算过程同计算容量维,不过将断裂构造转变为矿床出露点。

统计结果见表 5,分形维数计算见图 5。岩浆热

表4 夏河-合作地区断裂构造分区信息统计参数表

Table 4 Statistical parameters of fault structure subarea information in the Xiahe-Hezuo area

| 分区编号 | 尺度/km | | | | 信息维 | 判定系数 (R^2) | 分区编号 | 尺度/km | | | | 信息维 | 判定系数 (R^2) |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| | 5.5555 | 2.7777 | 1.3888 | 0.6944 | | | | 5.5555 | 2.7777 | 1.3888 | 0.6944 | | |
| 1 | 0.2922 | 0.6488 | 1.0002 | 1.6573 | 1.4771 | 0.9730 | 20 | 0.5545 | 1.0601 | 1.4090 | 1.6812 | 1.2388 | 0.9804 |
| 3 | 0.5784 | 0.9030 | 1.2041 | 1.4624 | 0.9810 | 0.9975 | 21 | 0.6784 | 1.0414 | 1.3424 | 1.5797 | 0.9982 | 0.9913 |
| 4 | 0.4392 | 0.8596 | 1.2408 | 1.4924 | 1.1762 | 0.9881 | 23 | 0.1781 | 0.5428 | 1.0788 | 1.5061 | 1.5015 | 0.9952 |
| 5 | 0.5303 | 1.0981 | 1.4457 | 1.7726 | 1.3535 | 0.9805 | 24 | 0.3899 | 0.8148 | 1.1601 | 1.4925 | 1.2135 | 0.9965 |
| 6 | 0.5784 | 1.1519 | 1.4893 | 1.8806 | 1.4098 | 0.9863 | 27 | 0.4515 | 0.6989 | 1.0000 | 1.2304 | 0.8763 | 0.9976 |
| 7 | 0.5932 | 1.0002 | 1.4000 | 1.7900 | 1.3255 | 0.9999 | 28 | 0 | 0.4505 | 0.7783 | 1.0792 | 1.1844 | 0.9906 |
| 8 | 0.4686 | 0.6146 | 1.3454 | 1.6561 | 1.4262 | 0.9415 | 29 | 0.2764 | 0.4515 | 0.8795 | 1.2408 | 1.1033 | 0.9756 |
| 9 | 0.6020 | 0.9542 | 1.2304 | 1.5185 | 1.0051 | 0.9969 | 30 | 0.5784 | 1.0414 | 1.2787 | 1.5683 | 1.0654 | 0.9784 |
| 10 | 0.5983 | 1.1628 | 1.5905 | 2.0429 | 1.5817 | 0.9961 | 31 | 0.6020 | 0.9542 | 1.2304 | 1.5185 | 1.0051 | 0.9969 |
| 11 | 0.4392 | 0.7470 | 1.4522 | 1.6573 | 1.4482 | 0.9568 | 32 | 0.3010 | 0.3010 | 0.4771 | 0.7783 | 0.5341 | 0.8500 |
| 13 | 0.4771 | 0.7781 | 1.0792 | 1.3424 | 0.9624 | 0.9990 | 35 | 0.6020 | 0.8451 | 1.1139 | 1.4149 | 0.8994 | 0.9977 |
| 14 | 0.4771 | 0.8451 | 1.1761 | 1.4623 | 1.0918 | 0.9969 | 36 | 0.8060 | 1.0000 | 1.2787 | 1.5185 | 0.8026 | 0.9956 |
| 15 | 0.4391 | 0.8796 | 1.2304 | 1.5185 | 1.1922 | 0.9910 | 37 | 0.7094 | 0.6989 | 0.9542 | 1.2787 | 0.6521 | 0.8653 |
| 16 | 0.7765 | 0.8278 | 1.1664 | 1.4862 | 0.8197 | 0.9306 | 38 | 0.4515 | 0.8873 | 1.1664 | 1.4913 | 1.1290 | 0.9912 |
| 18 | 0 | 0.3010 | 0.6020 | 0.8451 | 0.9422 | 0.9975 | 39 | 0.2764 | 0.6777 | 0.9866 | 1.2470 | 1.0699 | 0.9904 |
| 19 | 0.6020 | 0.8451 | 1.0792 | 1.3617 | 0.8349 | 0.9982 | 40 | 0.5774 | 1.0599 | 1.2934 | 1.6627 | 1.1592 | 0.9829 |

液型矿床分形维数0.4352, 矽卡岩型矿床分形维数0.3967。侏罗纪矿床分形维数0.3363, 三叠纪矿床分形维数0.4486。

2.3.2 矿床数量及密度分形结构特征

矿床沉积密度可进行定量分形分析, 矿床点满足密度幂律关系(Mandelbrot, 1982), 计算公式如下:

$$d(r) = Kr^{D-2} (2 > D > 0) \quad (6)$$

其中, $d(r)$ 为以某个点为圆心, 半径为 r 的圆限定的区域中的点的密度, D 为密度分形维数, K 为常数。本次计算过程选择研究区枣子沟金矿、以地南

金矿、加甘滩矿、隆瓦寺院矿床作为原点, 以半径 r 为 6 km、12 km、18 km、24 km、30 km 的圆覆盖研究区, 统计圆内全区金属矿床以及金矿的数量, 并计算矿床的密度(表6)。

根据计算公式(6)计算分形维数。研究区总体金属矿床和金矿床平均数量分形维数分别为 1.5889、1.6384, 判定系数(R^2)分别为 0.9961、0.9915; 全区总体金属矿床和金矿床平均密度分形维数分别为 1.589、1.638, 判定系数(R^2)分别为 0.9437、0.9559, 反映矿床沉积密度较高, 成矿流体易聚集成超大型矿床(图6)。

表5 夏河-合作地区矿床空间分布维值计算参数

Table 5 Parameters for calculating the spatial distribution dimension of ore deposits in the Xiahe-Hezuo area

| 矿床成因类型 | 参数 | | | | 矿床成矿时代 | 参数 | | | |
|---------|---------|--------|---------|------------|--------|---------|--------|---------|------------|
| | r/km | $N(r)$ | $\ln r$ | $\ln N(r)$ | | r/km | $N(r)$ | $\ln r$ | $\ln N(r)$ |
| 岩浆热液型矿床 | 11.1111 | 18 | 1.0457 | 1.2553 | 侏罗纪 | 11.1111 | 5 | 1.0457 | 0.6989 |
| | 5.5555 | 34 | 0.7447 | 1.5314 | | 5.5555 | 7 | 0.7447 | 0.8451 |
| | 2.7777 | 39 | 0.4437 | 1.5911 | | 2.7777 | 9 | 0.4437 | 0.9542 |
| | 1.3888 | 47 | 0.1426 | 1.6721 | | 1.3888 | 10 | 0.1426 | 1.0000 |
| 矽卡岩型矿床 | 11.1111 | 9 | 1.0457 | 0.9542 | 三叠纪 | 11.1111 | 23 | 1.0457 | 0.3617 |
| | 5.5555 | 13 | 0.7447 | 1.1139 | | 5.5555 | 42 | 0.7447 | 1.6232 |
| | 2.7777 | 16 | 0.4437 | 1.2041 | | 2.7777 | 53 | 0.4437 | 1.7242 |
| | 1.3888 | 21 | 0.1426 | 1.3222 | | 1.3888 | 60 | 0.1426 | 1.7781 |

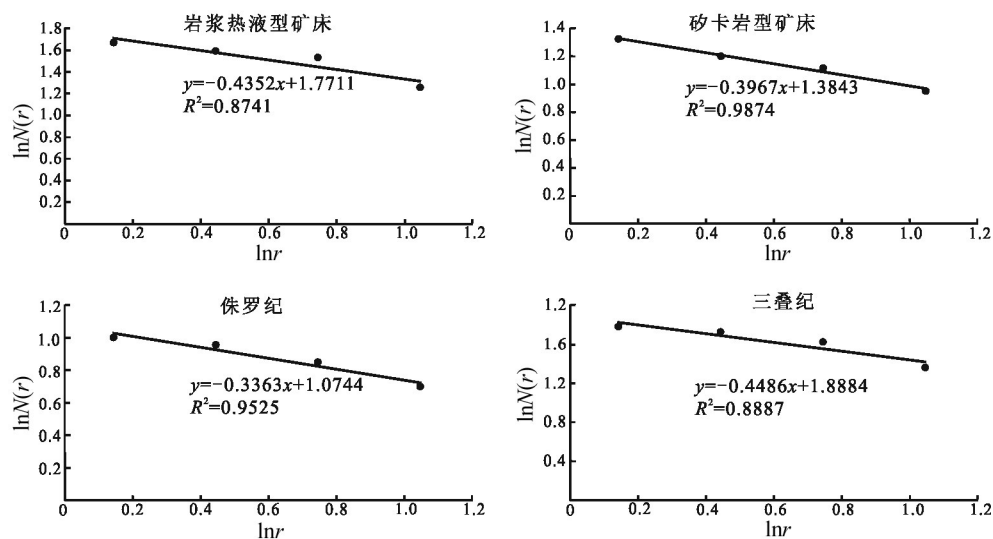
图5 夏河-合作地区矿床空间分布分维 $\ln N(r)$ - $\ln r$ 拟合直线图Fig. 5 Fitting line diagram of the fractal dimension $\ln N(r)$ - $\ln r$ of the spatial distribution of ore deposits in the Xiahe-Hezuo area

表6 夏河-合作地区矿床密度及数量统计表

Table 6 Statistics of mineral deposit density and quantity in the Xiahe-Hezuo area

| 半径(r) /km | 总体矿床 平均数量/个 | 总体矿床密 度/(个/km ²) | 金矿床平均 数量/个 | 金矿床平均 密度/(个/km ²) |
|------------------|----------------|---------------------------------|---------------|----------------------------------|
| 6 | 4 | 0.035367795 | 2.75 | 0.024315359 |
| 12 | 10.25 | 0.022657494 | 8 | 0.017683898 |
| 18 | 22.5 | 0.022104872 | 17.5 | 0.017192678 |
| 24 | 36.25 | 0.02003254 | 27.75 | 0.015335255 |
| 30 | 48.5 | 0.017153381 | 3 | 0.012732406 |

2.4 Fry分析

Fry分析是一种对点目标进行空间自相关分析的几何方法,一开始是研究岩石中的应变和应变分配(Fry et al., 1979)。随着技术理论的深入研究,该分析方法逐步应用于探讨矿床的空间展布规律,揭示矿床沉积点位的空间位置和联系(Zhao et al., 2023),以及断裂构造与矿床的产出关系(Carranza, 2009; Carranza et al., 2010; Parsa et al., 2018; Zheng et al., 2020)。计算Fry点图中每15°方向范围内矿床的数量,并绘制相应的玫瑰花图,可以用来解释矿床出露点分布的方向性,具体分析步骤为:①研究区矿床出露点被视为原始点集,选择中心部位的一点作为原点;②复制原始点集,将点集中某点覆盖在原点上,保留点集位置;③重复以上步骤,每个点都有一次机会覆盖在原点上。最后得到(n^2-n)个点,称之为Fry图,并根据Fry图制作矿点玫瑰花图,从而分析矿床的方向性。

Fry图(图7)显示,矿点呈北西走向,与研究区断裂构造走向一致,表明北西向断裂构造对矿床的控制强烈。通过矿点趋势,划分出2个有利成矿区,该分析结果与前人分析成果吻合。

本次以研究区Fry图为底图,选择中心位置为基准点,计算统计每15°区间范围内金矿床、铜矿和其他矿床的数量,并制作玫瑰花图(图8)展示出研究区矿点方向性。研究区金矿床的沉积趋势为北西-南东、北东-南西向,但分形维数显示,研究区南西部成矿几率较低。铜矿优势方位为北西,其他金属矿床则呈各向发育。

3 研究区成矿预测

分形维数对矿床的定位有一定的指示意义,断裂构造通常是成矿流体的流通通道,也是赋存空间,结合研究区容量维和信息维作分形维数等值线图(图9a、b),判断研究区有利的成矿部位,为找矿预测提供理论指导。

断裂容量维等值线图(图9a)显示,容量维大于1.22的区域主要分布于研究区中部至东部(红色区域),整体呈北西走向串珠状,容量维高值区正好处于以地南金矿床出露部位。容量维值高低过渡区位于研究区中部,已探测到大量金矿矿床,其中以枣子沟、加甘滩等特大型金矿最为著名。容量维高值区地质构造复杂,连通性较好,能保证成矿流体远

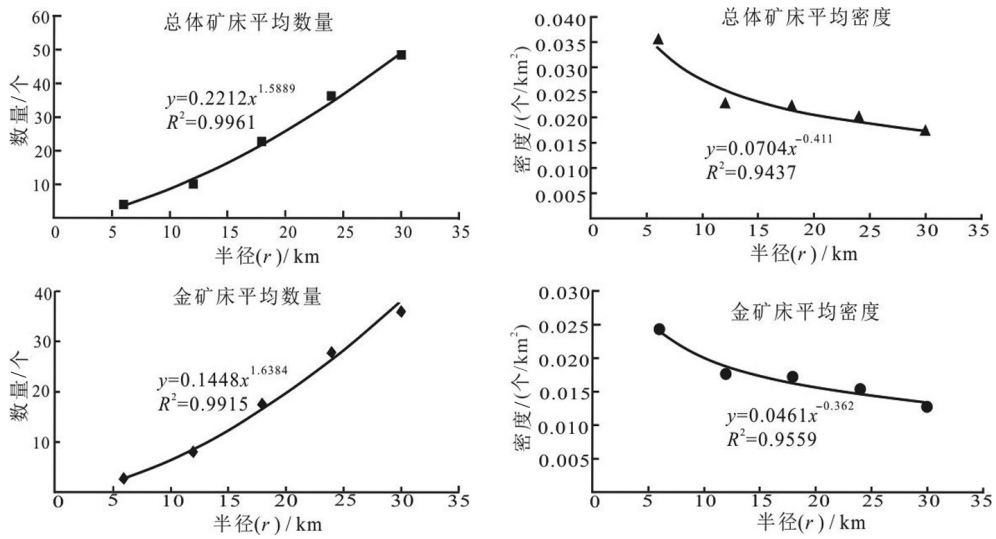


图6 夏河-合作地区矿床密度-数量趋势图

Fig. 6 Trend chart of density-quantity of deposits in the Xiahe-Hezuo area

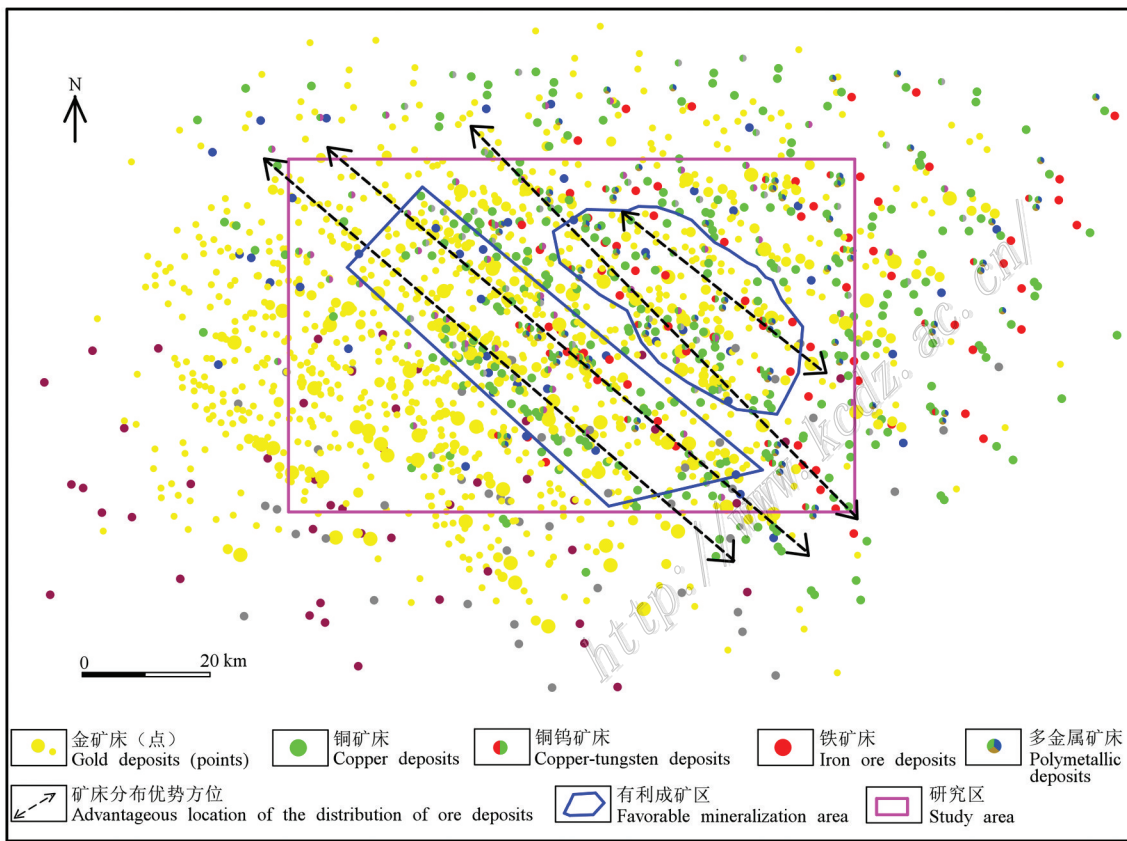


图7 夏河-合作地区矿床分布Fry点图

Fig. 7 Fry point map of the distribution of ore deposits in the Xiahe-Hezuo area

距离流动,在构造连通性减弱时沉积,该区也是有利成矿区。研究区南西侧容量维值较低,断裂构造较单一且孤立,能圈闭住成矿流体,为高值区输送来的成

矿流体于容量维高低过度区沉积提供堡垒。

信息维等值线图(图9b)显示,研究区北东高值、南西低值的特征,与容量维反映趋势相吻合。信

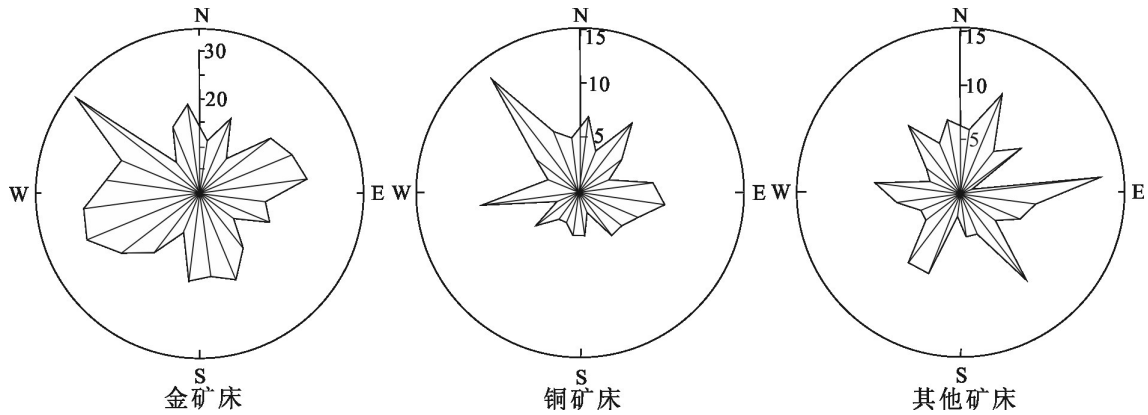


图 8 基于夏河-合作地区矿床 Fry 点图制作的玫瑰花图

Fig. 8 Rose map based on the Fry point map of ore deposits in the Xiahe-Hezuo area

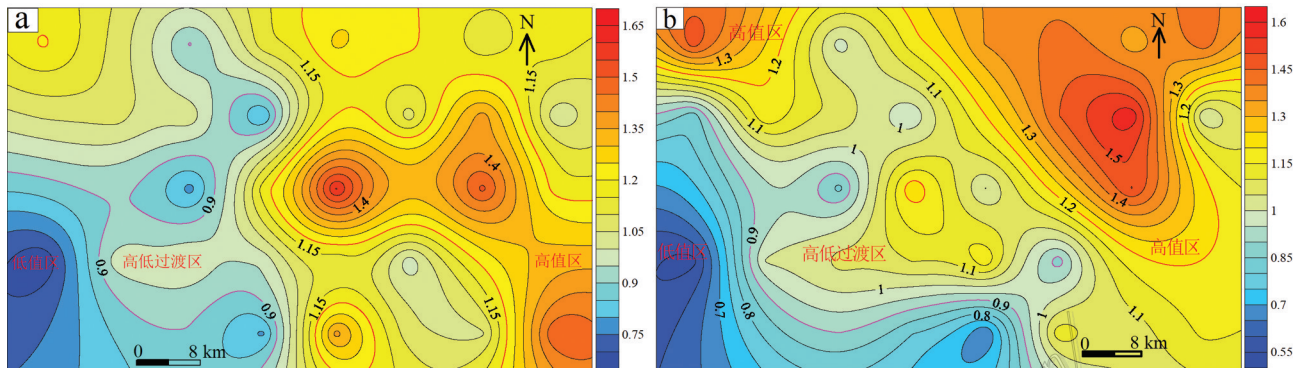


图 9 夏河-合作地区断裂容量维等值线图(a)和断裂信息维等值线图(b)

Fig. 9 Dimensional contour map of fault capacity (a) and dimension contour of fault information (b) in the Xiahe-Hezuo area

息维最大值区域(红色区域)分布着以地南超大型金矿,以及其他铜矿、铜钨矿等多金属矿床,矿床密集分布,矿产资源丰富。信息维值高低过度区同样分布着大量矿床,形成原因与容量维分析结果类似。

本次将容量维和信息维高值区、高低过度区划分为有利成矿区。研究区矿床主要分布于区内中部,整体呈“北西呈带,北东成串”的特征,分析结果符合实际勘探结果,证明断裂构造分形理论进行区域成矿预测具有一定可行性。

以分形维数临界值 1.22~1.38 为划分标准,综合容量维等值线图、信息维等值线图以及 Fry 成矿预测图相互叠加划分出有利成矿区(图 10)。

区域 I:该区域为重点找矿靶区,断裂构造容量维和信息维皆处于或大于分形维数临界值,也是 Fry 分析有利成矿区,断裂构造在该区域发育且复杂,有利于矿床的富集,成矿潜力巨大,已探明以地南特大型金矿床及众多其他多金属矿床,根据分形维数特

征,预测该区域深部、断裂交叉部位以及次级断裂部位存在隐伏矿床的可能性较大,预测结果与前人分析结果一致(李康宁等,2020)。

区域 II:大多处于 I 区的边部,属于容量维值高值区、信息维值高值区、Fry 分析有利成矿区两两重合区域,找矿潜力次于区域 I。

区域 III:此区域包含有容量维值高值区、信息维值高值区、Fry 分析有利成矿区其中之一,该区域在研究区分布范围最大,特别是在研究区中部地带,研究区南西部分形维数低值区对成矿流体形成圈闭作用,造成区域 III 同样找矿潜力巨大。

4 结 论

(1) 通过夏河-合作地区断裂构造分形维数统计分析,整体断裂构造容量维 1.2374,信息维 1.1118,具有较强的统计自相似性。北西向断裂容量维

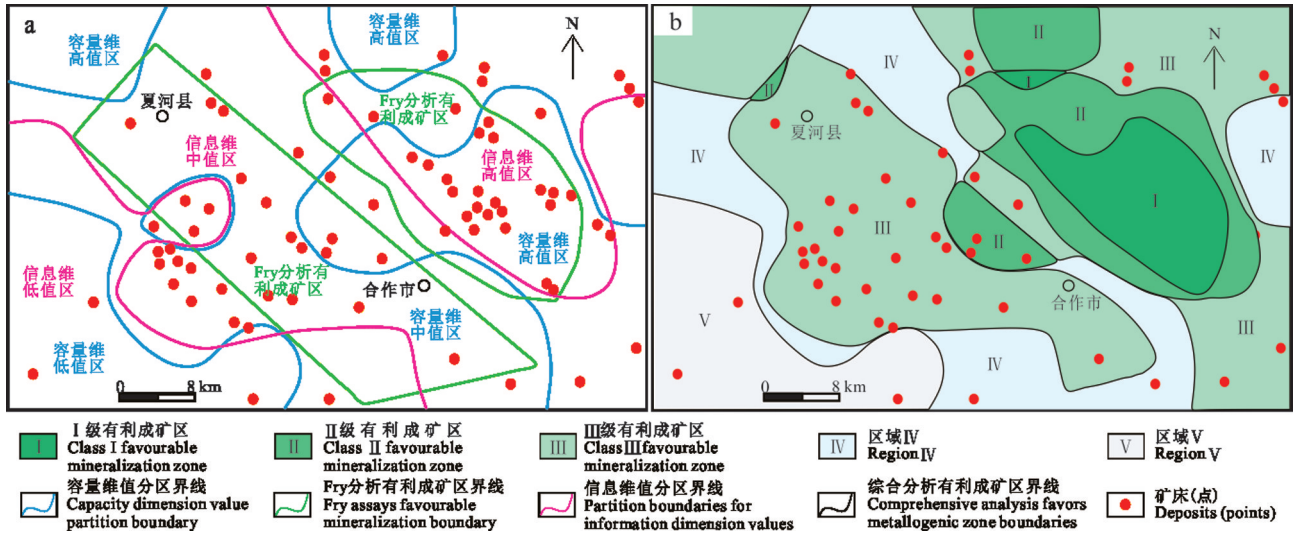


图 10 夏河-合作地区成矿预测图(a)和综合分析有利成矿区预测图(b)

Fig. 10 Metallogenetic prediction map (a) and favorable metallogenetic area prediction map by comprehensive analysis (b) of the Xiahe-Hezuo area

1.2385, 信息维 1.2296, 反映北西向断裂对矿床的控制最强。

(2) 夏河-合作地区岩浆热液型和矽卡岩型矿床显示出单一分形分布特征, 反映成矿物质来源单一。总体金属矿床和金矿床平均数量分形维数分别为 1.5889、1.6384, 平均密度分形维数分别为 1.589、1.638, 指示了矿床沉积密度高、数量多和规模大的特点, 区内找矿潜力巨大。

(3) 断裂构造分形维数可以表征矿床的沉积部位, 通过夏河-合作地区容量维、信息维等值线图以及 Fry 图综合分析, 圈定出 3 个有利成矿区域, 区域 I 最有利成矿, 区域 II 和区域 III 次之。

致谢 研究工作得到了甘肃省合作早子沟金矿有限责任公司仲海书、殷超、田向盛等提供资料和野外工作上的支持, 审稿专家提出宝贵的修改意见, 在此一并致以诚挚的感谢!

References

Carranza E J M and Sadeghi M. 2010. Predictive map of prospectivity and quantitative estimation of undiscovered VMS deposits in Skellefte district (Sweden)[J]. *Ore Geology Reviews*, 38(3): 219-241.

Carranza E J M. 2009. Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial pattern and spatial association with geological features[J]. *Ore Geology Reviews*, 35(3-4): 383-400.

Cui Z L, Liu X Y and Zhou J X. 2021. Fractal characteristics of faults and its geological significance in Sichuan-Yunnan-Guizhou Pb-Zn metallogenetic Province, China[J]. *World Geology*, 40(1): 75-92(in Chinese with English abstract).

Cui Z L, Huang E, Liu G H, Chen H and Guo X Y. 2022. Fractal analysis of structural characteristics and prospecting of the Luanchuan polymetallic mining district, China[J]. *Open Geosciences*, 14: 1147-1159.

Cui Z L, Yao Y L, Cheng J H, Luo K and Zhou J X. 2022. Structural fractal texture characteristics and its prospecting significance for the Yadu-Mangdong metallogenetic belt in NW Guizhou Province[J]. *Geological Journal of Chinese Universities*, 28(4): 592-605(in Chinese with English abstract).

Di P F, Tang Q Y, Liu C, Song H, Zhang J, Liu D X, Wang Y X and Pu W F. 2021. Trace element characteristics of quartz from the Zaozigou and Jiagantan gold deposits in the Xiahe-Hezuo district, west Qinling[J]. *Geoscience*, 35(6): 1608-1621(in Chinese with English abstract).

Du B, Shen J and Santosh M. 2021. Textural compositional and isotopic characteristics of pyrite from the Zaozigou gold deposit in West Qinling, China: Implications for gold metallogeny[J]. *Ore Geology Reviews*, 130: 103917.

Fan C H, Tao J L, Zhou K, Hu F and Huang W. 2017. Fractal characteristics of fracture of Xujiache formation in Fault-Fold Belt of Central Yuanba area[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 39(1): 35(in Chinese with English abstract).

Fry N. 1979. Random point distributions and strain measurement in rocks[J]. *Tectonophysics*, 60(1-2): 89-105.

He J Z, Ding Z J, Zhu Y X, Zhen H X, Zhang W R and Liu J. 2024. The Metallogenetic series in West Qinling, Gansu Province, and

- their quantitative estimation[J]. *Earth Science Frontiers*: 1-17 [2024-03-07].<https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2023.2.68>.
- Jiang H B, Yang H Q, Zhao G B, Tan W J, Wen Z L, Li Z H, Gu P Y, Li J Q, Guo P H and Wang Y H. 2023. Discussion on the metallogenic regularity in West Qinling Metallogenic Belt, China[J]. *Northwest Geology*, 56(2): 187-202(in Chinese with English abstract).
- Jiang Y L, Song W J, Kong X, Li T R, Li Y Y and Zhou P X. 2023. Developmental characteristics and geological significance of the fault system in the Jungg[J]. *Chinese Journal of Geology*, 58(2): 398-411(in Chinese with English abstract).
- Jin X Y, Li J W and Hofstra A. 2017. Magmatic-hydrothermal origin of the Early Triassic Laodou lode gold deposit in the Xiahe-Hezuo district, West Qinling orogen, China: Implications for gold metallogeny[J]. *Mineral Deposita*, 52:883-902.
- Kruhl S H. 1994. *Fractals and dynamics systems in geoscience*[M]. New York: Springer Verlag, 37-52.
- Li F, Liu G S, Zhou Q W and Zhao G B. 2016. Application of fractal theory in the study of the relationship between fracture and mineral[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition)*, 39(5): 701-706(in Chinese with English abstract).
- Li H Y, Pang Q, Wei K Y, Zeng Y, Cui Y X and Zhu Y S. 2023. Influence of pore structure fractal features of tight sandstone reservoir on gas-water seepage law: A case study of shan 1 member in tao 2 block of southeastern Sulige gas field[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 30(2):177-185(in Chinese with English abstract).
- Li K N, Jia R Y, Li H R, Tang L, Liu B C, Yan K and Wei L L. 2020. The Au-Cu polymetallic mineralization system related to intermediate to felsic intrusive rocks and the prospecting prediction in Xiahe-Hezuo area of Gansu, West Qinling Orogenic Belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(8): 1191-1203(in Chinese with English abstract).
- Liang Z L, Chen G Z, Ma H S and Zhang Y N. 2016. Evolution of ore-controlling faults in the Zaozigou gold deposit, western Qinling[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(2): 354-366(in Chinese with English abstract).
- Liao J F, Feng Z H, Luo C Q and Kang Z Q. 2012. Fractal characteristics analysis of fractures in Shuiyanba ore field of Hezhou Guangxi[J]. *Geology of Ore Deposits*, 31(3): 459-464(in Chinese with English abstract).
- Liu C X, Chen Y Y, Luo X G, Liang Z L, Jin D G and Ma H S. 2018. Study on characteristics and exploration significance of main ore belt and orebody of Zaozigou super large gold deposit in Hezuo, Gansu Mineral[J]. *Resources and Geology*, 32(6): 969-977(in Chinese with English abstract).
- Lu X W and Ma D S. 1999. The fractal dimension of the fault system in the central Hunan antimony belt and its indicative effect on the migration of ore-forming fluids and the positioning of ore deposits[J]. *Geology of Mineral Deposits*, 18(2):168-174(in Chinese with English abstract).
- Lu Y C. 2016. Skarn copper (gold) metallogeny and metallogenic regularities in the West section of the western Qinling orogen[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Mandelbrot B B. 1967. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. *Science*, 156: 636-638.
- Mandelbrot B B. 1982. *The fractal geometry of nature*[M]. New York: WH Freeman.
- Mandelbrot B B and Wang J Z. 1991. *Fractals-geometry of Nature*[J]. *World Science*, (11): 1-4.
- Parsa M, Maghsoudi A and Yousefi M. 2018. Spatial analyses of exploration evidence data to model skarn-type copper prospectivity in the Varzaghan district, NW Iran[J]. *Ore Geology Reviews*, 92: 97-112.
- Sun T, Li H, Wu K X, Chen L K, Liu W M and Hu Z J. 2018. Fault fractal and multifractal characteristics of Tongling ore cluster[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 8(4): 111-115(in Chinese with English abstract).
- Sun T, Liao Z Z, Wu K X, Chen L K, Liu W M and Yi L Y. 2017. Fractal distribution characteristics and geological significances of fracture structure in southern Jiangxi[J]. *Journal of Jiangxi University of Science and Technology*, 38(1): 48-54(in Chinese with English abstract).
- Sun W J, Wu Z P, Jiang Y L and Cheng Y J. 2022. Fractal characteristics and metallogenic significance of fault systems in Kalamaili area, Eastern Junggar[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 49(6): 734-742(in Chinese with English abstract).
- Wan L, Wang Q F and Yang L Q. 2007. Multifractal characteristics of various metallogenic elements in Damoqujia ore deposit, Shandong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1211-1216(in Chinese with English abstract).
- Wang L. 2023. Metallogenic series, regularity and prospecting the direction of the West Qinling metallogenic belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(4): 649-659(in Chinese with English abstract).
- Wang W, Liu M Y, Shi G W, Li J Q and Wang Y Q. 2016. Fractal characteristics study of fractures in Zhaxikang ore-concentrated area of Longzi County, Tibet[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 32(4): 358-365(in Chinese with English abstract).
- Wang X S and Yang Y H. 2000. Study on multiple fractal of faults in East Junggar area of Xinjiang[J]. *Geotectonics and Metallurgy*, (2): 182-188(in Chinese with English abstract).
- Wei L X, Chen Z L, Pang Z S, Han F B and Xiao C H. 2018. An analysis of the tectonic stress field in the Zaozigou gold deposit, Hezuo area, Gansu Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 39(1): 79-93(in Chinese with English abstract).
- Xie H P. 1994. Correlation between fractal distribution of faults[J]. *Journal of China Coal Society*, 19(5): 445-449(in Chinese with English abstract).
- Xie Y S, Tan K X and Hao T. 2010. Fractal and chaotic dynamics mechanism for tectonic-fluid-mineralization[J]. *Geotectonics and Metallography*, 34(3): 378-385(in Chinese with English abstract).
- Xie Y S and Tan K X. 2002. Fractal research on fracture structures and application in geology[J]. *Geology and Geochemistry*, (1): 71-77

(in Chinese with English abstract).

- Yu H C, Guo C A and Qiu K F. 2019. Geochronological and geochemical constraints on the formation of the giant Zaozigou Au-Sb deposit, West Qinling, China[J]. *Minerals*, 9(1): 37.
- Yu Z B. 2022. 3D mineral prospectivity map of Zaozigou gold deposit, West Qinling, China: Deep learning-based mineral prediction[J]. *Minerals*, 12(11): 1382.
- Zhang G W, Guo A L and Yao A P. 2004. West Qinling-Songpan tectonic junction in Chinese mainland tectonics[J]. *Geoscience Frontier*, 11(3): 23-32(in Chinese with English abstract).
- Zhao S P, Pang X C and Guo Y S. 2015. Analysis of fractal characteristics at the Longmudian silver mine in Henan Province[J]. *Gold Science and Technology*, 23(3): 12-18(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z, Chen J and Cheng B. 2023. Spatial analysis of structure and metal mineralization based on fractal theory and Fry analysis: A case study in Nenjiang-Heihe metallogenic belt[J]. *Minerals*, 13(3): 313.
- Zheng D, Ni C and Zhang S. 2020. Significance of the spatial point pattern and Fry analysis in mineral exploration[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 13: 1-11.
- Zhu J B, Ji Y L and Li C H. 2005. Quantitative characterization of development degree of fractures in fault system by fractal dimension[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 26(5): 57-60(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 崔中良, 刘祥云, 周家喜. 2021. 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*, 40(1): 75-92.
- 崔中良, 姚艳领, 程金华, 罗开, 周家喜. 2022. 黔西北岷都-麟硐成矿带构造分形结构特征及找矿意义[J]. *高校地质学报*, 28(4): 592-605.
- 第鹏飞, 汤庆艳, 刘聪, 宋宏, 张家, 刘东晓, 王玉玺, 蒲万峰. 2021. 西秦岭夏河-合作地区早子沟和加甘滩金矿床石英微量元素特征及意义[J]. *现代地质*, 35(6): 1608-1621.
- 范存辉, 陶佳丽, 周坤, 胡峰, 黄为. 2017. 元坝中部断褶带须家河组裂缝分形特征[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 39(1): 35-42.
- 何进忠, 丁振举, 朱永新, 甄红旭, 张万仁, 刘杰. 2024. 甘肃西秦岭矿床成矿系列及其量化评价[J/OL]. *地学前缘* <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2023.2.68>.
- 姜寒冰, 杨合群, 赵国斌, 谭文娟, 温志亮, 李宗会, 辜平阳, 李健强, 郭培虹, 王永和. 2023. 西秦岭成矿带区域成矿规律概论[J]. *西北地质*, 56(2): 187-202.
- 姜颜良, 孙文洁, 孔雪, 李天然, 李彦颖, 周培兴. 2023. 准噶尔-北天山盆地过渡带断裂系统发育特征及地质意义[J]. *地质科学*, 58(2): 398-411.
- 李飞, 刘国生, 周庆卫, 赵光宝. 2016. 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)*, 39(5): 701-706.
- 李昊远, 庞强, 魏克颖, 曾源, 崔宇翔, 朱玉双. 2023. 致密砂岩储层孔隙结构分形特征对气水渗流规律的影响——以苏里格气田东南部桃2区块山1段为例[J]. *断块油气田*, 30(2): 177-185.
- 李康宁, 贾儒雅, 李鸿睿, 汤磊, 刘伯崇, 严康, 韦乐乐. 2020. 西秦岭甘肃夏河-合作地区与中酸性侵入岩有关金铜多金属成矿系统及找矿预测[J]. *地质通报*, 39(8): 1191-1203.
- 梁志录, 陈国忠, 麻红顺, 张愿宁. 2016. 西秦岭早子沟金矿控矿断裂形成演化[J]. *大地构造与成矿学*, 40(2): 354-366.
- 廖家飞, 冯佐海, 罗畅权, 康志强. 2012. 广西贺州水岩坝矿田断裂构造分形特征分析[J]. *矿床地质*, 31(3): 459-464.
- 刘春先, 陈耀宇, 雒晓刚, 梁志录, 金鼎国, 麻红顺. 2018. 甘肃合作早子沟特大型金矿床主矿带、主矿体特征及勘查、研究意义剖析[J]. *矿产与地质*, 32(6): 969-977.
- 卢新卫, 马东升. 1999. 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*, 18(2): 168-174.
- 路英川. 2016. 西秦岭造山带西段砂卡岩型铜(金)矿床成矿作用与成矿规律[D]. 北京: 中国地质大学.
- 曼德尔布罗特, 王继振. 1991. 分形——自然界的几何学[J]. *世界科学*, (11): 1-4.
- 孙涛, 廖泽忠, 吴开兴, 陈陵康, 刘卫明, 易秤云. 2017. 赣南地区断裂构造的分形分布特征及其地质意义[J]. *江西理工大学学报*, 38(1): 48-54.
- 孙涛, 李杭, 吴开兴, 陈陵康, 刘卫明, 胡紫娟. 2018. 铜陵矿集区断裂分形与多重分形特征[J]. *有色金属工程*, 8(4): 111-115.
- 孙文洁, 吴智平, 姜颜良, 程燕君. 2022. 东准噶尔卡拉麦里地区断裂系统分形特征及成矿意义[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 49(6): 734-742.
- 万丽, 王庆飞, 杨立强. 2007. 山东大磨曲家矿区成矿元素多重分形特征[J]. *岩石学报*, 23(5): 1211-1216.
- 王雷. 2023. 西秦岭成矿带成矿系列、成矿规律与找矿方向[J]. *地球学报*, 44(4): 1-11.
- 王维, 刘敏院, 史功文, 李及秋, 王益庆. 2016. 西藏隆子县扎西康矿集区断裂构造分形特征及其找矿意义[J]. *华南地质与矿产*, 32(4): 358-365.
- 王喜生, 杨永华. 2000. 新疆东准噶尔地区断裂的多重分形研究[J]. *大地构造与成矿学*, (2): 182-188.
- 韦良喜, 陈正乐, 庞振山, 韩凤彬, 肖昌浩. 2018. 甘肃省合作市早子沟金矿床构造应力场分析[J]. *地球学报*, 39(1): 79-93.
- 谢和平. 1994. 断层分形分布之间的相关关系[J]. *煤炭学报*, 19(5): 445-449.
- 谢焱石, 谭凯旋. 2002. 断裂构造的分形研究及其地质应用[J]. *地质地球化学*, (1): 71-77.
- 谢焱石, 谭凯旋, 郝涛. 2010. 构造-流体-成矿作用的分形与混沌动力学[J]. *大地构造与成矿学*, 34(3): 378-385.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭-松潘大陆构造结[J]. *地学前缘*, 11(3): 23-32.
- 赵少攀, 庞绪成, 郭跃闪, 张凯涛. 2015. 河南龙门店银矿断裂构造分形特征分析[J]. *黄金科学技术*, 23(3): 12-18.
- 朱剑兵, 纪友亮, 李储华. 2005. 利用分形维数定量表征断裂发育程度——以红柳地区为例[J]. *石油学报*, 26(5): 57-60.