

金矿脉分形特征及找矿意义研究

李洪志

宋玉国

(中国地质大学, 北京) (国家黄金管理局)

各种类型的金矿脉常呈不规则的几何形状产出, 对它们用欧几里德方法进行描述和分析, 不仅难以精确地说明其几何形态特征, 有时甚至无法作出实际测量, 因此也就很难掌握其产状变化的准确趋势, 给金矿床的定量定位预测造成了困难. 分形理论为获得有关隐伏矿床 (脉) 分布的更为准确的信息提供了有利工具. 通过对招远灵山和河东两个典型金矿床矿脉分维数、几何丰度和有效紧密度等研究, 讨论了分形理论在紧密结合地质特征条件下, 客观准确揭示不规则矿脉变化规律及在找矿预测等方面的应用前景.

关键词 分维数 几何丰度 有效紧密度 金矿脉

1 分形概述

分形理论的创始人是美籍科学家 B. B. Mandelbrot. 分形 (fractal geometry) 一词是根据拉丁词 fractus (原有破碎、非整数之意) 创造出来的^[1]. 分形是相对整形而言的, 它指的是那种处处不规则、处处不可微、具有自相似的几何体. 自然界到处有分形, 可以说整形乃是一种特例.

与分形几何比较, 整形 (欧几里德形状) 提供对人造对象的精确描述, 但不适于自然形状 (如海岸线), 二者比较如下^[2]:

欧几里德形状	分形形状
◦ 传统的 (> 2000 年)	◦ 现代的 (~ 10 年)
◦ 基于特征大小或尺寸	◦ 没有特定大小或比例
◦ 适于人造对象	◦ 适于自然形状
◦ 公式描述	◦ (递归) 算法

1.1 自相似性

考虑在分维数为 E 的欧氏空间中位置

$$\mathbf{x} = (x_1, \cdots, x_E)$$

处的一 S 点集, 在实际缩放比例 $0 < V < 1$ 时的相似变换下, 集 S 变为 VS , 位置在

① 本文是配合山东省招远河东金矿, 利用地质找矿新方法对河东金矿北东段及深部进行找矿评价研究项目的部分内容.

收稿日期: 1996-05-18. 修回日期: 1996-12-15. 张哲编辑.

$$V_x = (V_{x_1}, \dots, V_{x_e})$$

当 S 是 N 个不同 (不相交) 子集的并集, 而且每个子集与 V_S 全等时, 则有界集 S 是自相似的. 全集意味着在位移和旋转下相同. 分形或 S 的相似性分维数 (D) 于是由下式给出:

$$1 = N^D \quad \text{或} \quad D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{V}}$$

式中 V 为标度, N 为该标度量下所得到的数值, D 为分维数^[3].

1.2 测量分形的分维数 (D)

对于拓扑上的一维分形“曲线”, 明显的是“长度”随测量大小而变化. 若整个自相似曲线有最大长度 $L_{\max}$, 则在较小的尺度 $L = V L_{\max}$ ($V < 1$) 上, 该曲线包括 $N = 1/V^D$ 段长度 L , 这样对于 $D \geq 1$,

$$\text{长度} = L \cdot N = L \cdot \left(\frac{L_{\max}}{L}\right)^D \propto \frac{1}{L^{D-1}}$$

分形分维数 (D) 也通过线性大小 L 的 E 维“盒”来表征集 S 的覆盖. 若整个 S 包含在一个长度为 $L_{\max}$ 的盒中, 则边长为 L 的需覆盖 S 的盒子 $N_{\text{box}}(L)$ 的个数由如下方程给出:

$$N_{\text{box}}(L) = \left(\frac{L_{\max}}{L}\right)^D \quad \text{或者} \quad N_{\text{box}}(L) \propto \frac{1}{L^D}$$

2 金矿脉分形特征

金矿脉是自然形成的复杂系统^[4]. 随着轴向变化, 不同中段表现在二维平面上, 其分布特征为一不规则的复杂图像, 也具有统计意义上的自相似性.

对金矿脉不同中段分维数 D 测量, 是用步长法^[2]得到一个多边形, 边长为 λ , 周长为 P (P 和 λ 已用最大投影尺寸标准化). 改变 λ , 求相应的 $P(\lambda)$, 然后用 $\ln P - \ln \lambda$ 作图, 可得一条斜率为 m 的直线, 则分维数 $D = 1 + |m|$, 如图 2 (a) 所示.

由于分维数值的大小仅仅反映了矿脉断面轮廓的曲折程度, 要客观揭示矿脉变化规律, 需要引进几何丰度和有效紧密度概念.

几何丰度 (C) = 宽/长 (W/L), 即矿脉断面纵横比的倒数, 它在 1 到无限小之间变化.

有效紧密度 (E) = 有效面积/外部面积 (S_1/S_2), 它反映矿脉断面紧密度.

下面以山东省招远灵北断裂中灵山金矿 1 号脉和 5 号脉为例, 探讨其不同中段分维值 (D)、几何丰度 (C) 和有效紧密度 (E) 等参数变化规律 (边界品位大于 10×10^{-6}).

2.1 灵山金矿一般地质特征

灵山金矿位于山东省招远地区, 属中低温热液蚀变岩型金矿, 在区域上位于灵山—北截断裂带中段. 矿体产于该断裂带上盘玲珑花岗岩岩体中的次级断裂中, 受 NE 向正断层控制. 围岩蚀变具有明显的对称分布特征, 自矿体向围岩依次是: 强硅化—弱硅化—钾化. 灵山金矿具有多条矿化蚀变带, 其中 1 号和 5 号脉为主要矿脉. 成矿阶段可分 (1) 黄铁矿石英阶段; (2) 多金属硫化物阶段 (为主要成矿阶段); (3) 石英碳酸盐阶段. 主要矿物组合以黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿为主, 成矿元素组合为 Au、Cu、Ag、Pb、Zn、W、As、Sb、Bi 等.

2.2 1 号脉不同中段分形特征

在灵山金矿开采范围内, 1号矿体上部规模大, 集中分布在 -115m (海拔, 下同) 以上. 主矿体在纵向上投影为扁椭圆形, 以 10° 左右侧伏角向NE方向侧伏, 在平面上呈长透镜状. 水平厚度最厚 25m , 最长 350m , 矿体在走向上于 -20m 以上为连续, 在下部 -80m 中段尖灭再现. 选择 19m 中段和 -20m 中段作为研究对象, 讨论1号脉断面分维值(D)、几何丰度(C)和有效紧密度(E)等参数变化规律, 如图1(a)(b). 随着深度的增加, 1号脉二维断面分维值增加, 几何丰度增加, 有效紧密度增加, 如图2(b)(c)(d). 说明矿脉 -20m 中段二维平面占有面积比 19m 中段要大, 同时 -20m 中段矿脉水平空间展布较完整 (没有分支破碎), 因此 -20m 矿脉比 19m 矿脉具有更好的资源前景.

2.3 5号脉不同中段分形特征

5号脉有3个主矿体. 上部主矿体从地表至 -115m , 中部主矿体由 $-115\sim -270\text{m}$, 下部主矿体从 $-270\sim -500\text{m}$. 矿体形态呈透镜状, 最大长度 250m , 最大厚度 18m , 其中以 $-150\text{m}\sim -190\text{m}$ 矿体规模最大. 5号脉和1号脉皆受控于F₁断裂, 不同的是5号脉叠加F₈断裂控制. 选择 $-150\sim -190$ 和 -230m 矿脉断面作研究对象, 研究分维值(D)、几何丰度(C)和有效紧密度(E)等参数变化规律, 见图1(c)(d)(e).

利用不同中段作为横坐标, 分维值(D)、几何丰度(C)和有效紧密度(E)等参数分别作为纵坐标, 研究分维值(D)、几何丰度(C)和有效紧密度(E)在矿脉不同中段变化规律, 见图2(b)(c)(d). 其中图2(a)是分维数(D)的测量计算方法, 横坐标为边长 λ , 纵坐标为周长 P (P 和 λ 已用最大投影尺寸标准化). 改变 λ , 求相应的 $P(\lambda)$, 然后用 $\ln P - \ln \lambda$ 作图, 可得一条斜率为 m 的直线, 则分维数 $D = 1 + |m|$. 从 -150m 至 -190m , 分维值、几何丰度值增加, 有效紧密度值减少, 说明 -190m 中段矿脉平面面积增加, 但表现为矿脉不规则, 有分支复合现象; 从 $-190\text{m}\sim -230\text{m}$, 分维值、几何丰度值减小, 有效紧密度值增大, 说明矿脉由不规则状转为较规则状, 但 -230m 中段矿脉平面面积明显变小, 矿脉储量相应减少, 出现尖灭.

3 应用分形理论进行找矿预测实例

尽管分形理论为不规则金矿脉的描述提供了新的手段, 但利用分形理论进行实际研究时, 要根据不同矿山地质特征结合不同方法综合研究, 才能客观有效地进行找矿预测.

根据近几年对山东胶东地区金矿、河北金厂峪金矿、云南哀牢山金矿、河南灵宝地区金矿、四川康定黄金坪金矿、新疆阿尔泰地区金矿的研究, 以找矿为目的, 总结了金矿床找矿特征类型. 金矿床找矿特征有14种之多, 可分为五大类, 即: 控矿地质特征、成矿区域和时代特征、成矿作用特征、矿体形态特征、矿体分带及围岩蚀变特征. 详细分类见表1.

对于黄金矿山深部及外围找矿问题, 首先应树立理论找矿要为矿山生产服务这一原则, 重点开展找矿规律及找矿特征研究. 如胶东河东金矿床, 其地质特征是: 矿床受绿岩与花岗岩接触带——混合花岗岩前锋带及NE向深大断裂控制, 主成矿期为中生代燕山期 ($110\sim 115\text{Ma}$). 容矿围岩为郭家岭花岗岩, 矿体呈脉状、复脉状、网脉状, 走向较稳定, 纵向有明显分带规律, 倾角多在 35° 左右. 蚀变带以矿体为中心对称分布, 依次为黄铁绢英岩—绢英岩—绢英岩化花岗岩—红化花岗岩—花岗岩. 金成矿期发生在浸染状黄铁矿及多金属硫化物石英阶段. 确定其找矿特征类型为: I_AII_{AB}III_{AD}IV_{BV}BC型 (参见表1分类). 并以“正确诊断—

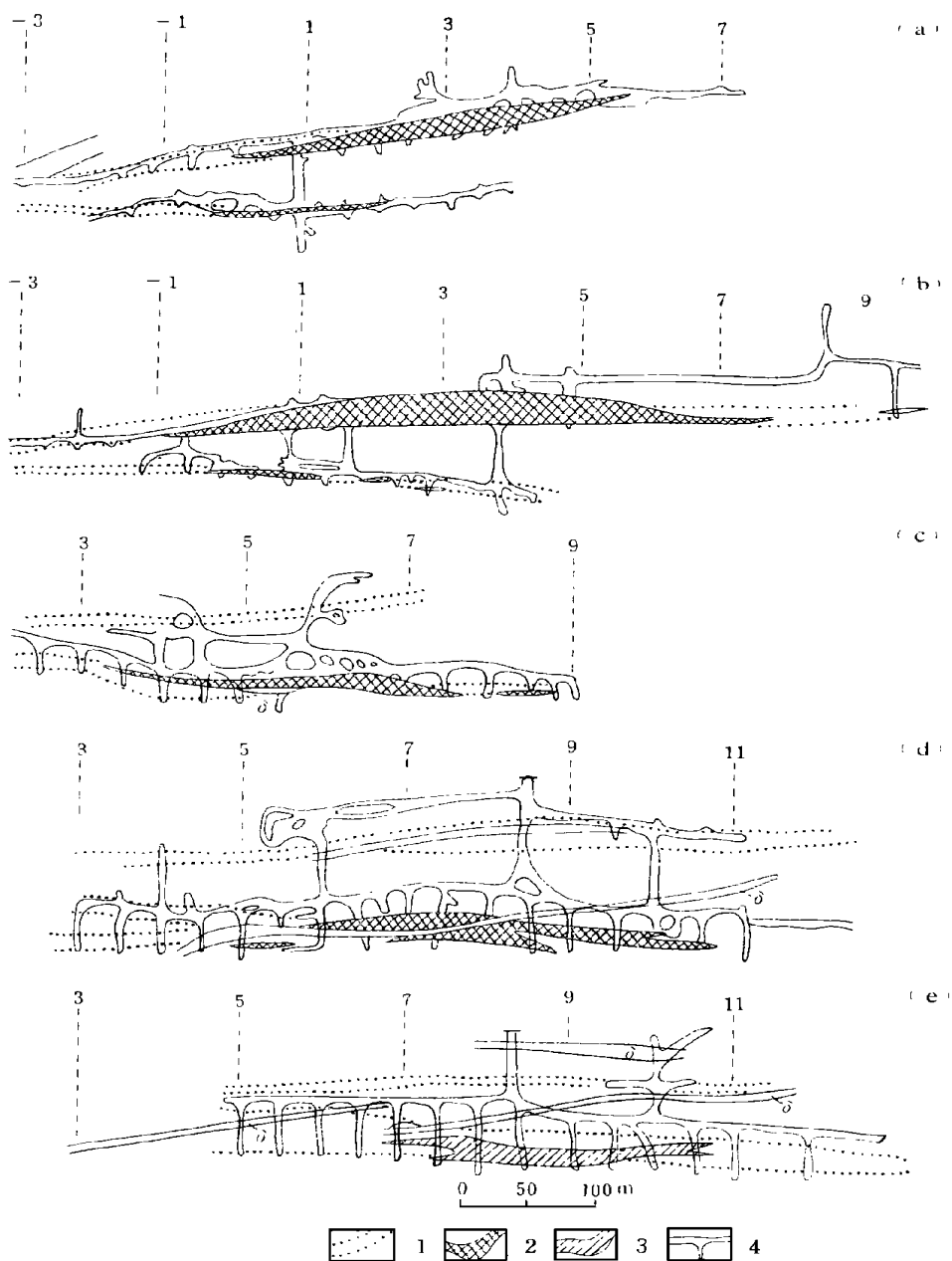


图 1 灵山金矿 1、5号脉不同中段分维 D 值及参数 C 、 E 值

Fig. 1 Fractal dimensions of gold-veins in Lingshan gold deposit

1—矿脉 (gold vein); 2—富矿体 (ore shoot), $> 10 \times 10^{-6}$; 3—矿体 (ore body), $5 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$; 4—坑道 (exploring opening); (a) 1号脉 19m中段, $D = 1.14$, $C = 0.06$, $E = 0.6$; (b) 1号脉—20m中段, $D = 1.176$, $C = 0.064$, $E = 0.86$; (c) 5号脉—150m中段, $D = 1.10$, $C = 0.056$, $E = 0.44$; (d) 5号脉—190m中段, $D = 1.194$, $C = 0.08$, $E = 0.4$; (e) 5号脉—230m中段, $D = 1.07$, $C = 0.05$, $E = 0.75$

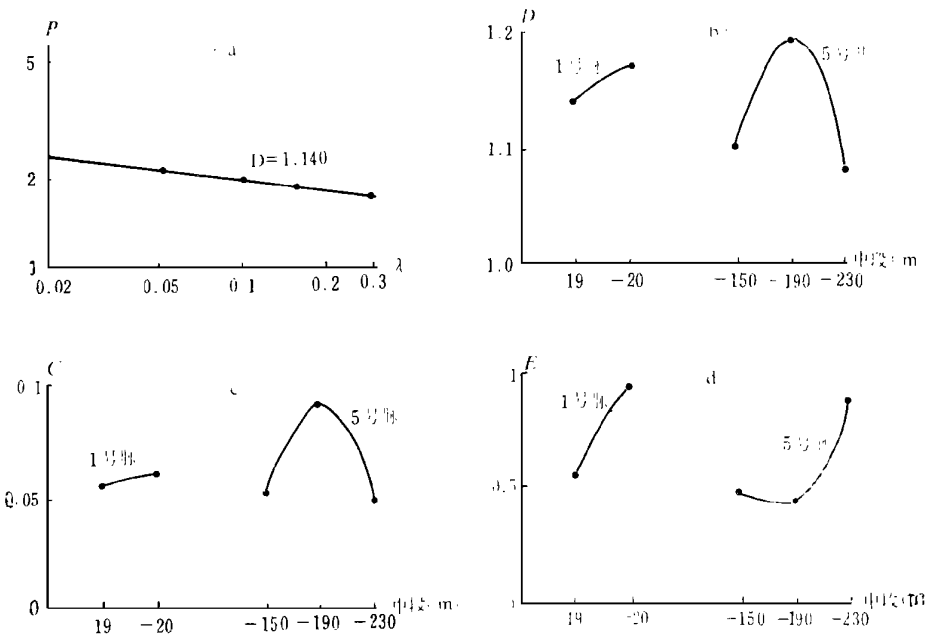


图 2 灵山金矿分维值 D (a) 及 D 、 C 、 E 值变化规律

Fig. 2 Variation of D , C and E values of gold veins by levels at Lingshan gold deposit
 P —标准化周长 (standardized perimeter); λ —标准化边长 (standardized side length)

对症下药—系统研究—技术定量优化”为技术路线进行金矿找矿预测 [5,6]。

表 1 金矿床找矿特征分类

Table 1 The taxonomic system of characteristics for gold deposit prospecting

基本类型	控矿特征	详细分类	内容解释	矿床实例
I	控矿地质特征	A: 构造控矿特征	构造控矿作用明显	金厂峪
		B: 沉积控矿特征	沉积控矿作用明显	板其
		C: 岩性控矿特征	容矿岩性控矿	马家窑
		D: 火成岩控矿特征	矿床受火成岩控制	邓格庄
II	成矿区域及时代特征	A: 成矿区域特征	成矿区域分布	胶东、冀东
		B: 成矿时代特征	成矿与时代相关	小秦岭
III	成矿作用特征	A: 内生成矿特征	内生成矿作用控制	河东
		B: 外生成矿特征	外生成矿作用控制	板其
		C: 变质成矿特征	变质成矿作用控制	金洞岔
IV	矿体形态特征	A: 矿体简单分布	透镜状、单脉状等	莒家庄
		B: 矿体复杂分布	复脉、网脉状等	金厂峪
V	矿体分带及围岩蚀变特征	A: 矿体沿走向分带	矿物元素分带规律	邓格庄
		B: 矿体沿纵向分带	矿物元素分带规律	黄金坪
		C: 围岩蚀变	矿物蚀变规律	百里店

下面以山东省招远地区河东金矿为例，简要说明根据矿体形态特征和矿体分带特征，用分形理论和地质地球化学方法进行找矿预测研究的方法。

3.1 基本地质特征

河东金矿区位于招远县城西北 30km. 本区在大地构造上位于沂沭断裂带的东侧, 基底构造为近于 E- W 走向的胶东隆起, 由太古宇 - 元古宇胶东群和荆山群组成. 中生代末期开始活化, 形成了一系列 NNE- NE 向的断裂构造, 并与 E- W 向的基底构造复合叠加, 这些 NNE- NE 向的断裂构造控制了本区金矿的分布. 矿区内与金矿化最密切的断裂带有 3 条, 自西向东分别为: 三山岛断裂 - 黄县 - 掖县弧形断裂和招远 - 平度断裂. 这 3 条断裂都是华夏系构造, 一般走向为 NE40~ 50°, 倾向 SE 或 NW, 倾角一般 60~ 70°, 断裂一般延伸大于 100km, 具有明显的压扭性质. 除此之外, 区内还发育 NE5~ 15° 的新华夏系断裂带, 是重要的控矿构造.

岩浆岩有 (1) 玲珑黑云母花岗岩, 主要呈 E- W 或 NE 向, 分布于招远、掖县的东北部; (2) 郭家岭花岗闪长岩, 主要分布于招远、掖县的东北部, 呈 NNE 向展布. 此外, 矿区内还有煌斑岩、闪长玢岩等脉岩产出.

3.2 矿床地质特征

区内已知大小蚀变带 10 余条, 其中较大者 2 条, 即河东蚀变带与侯家蚀变带. 侯家蚀变带经矿区的北缘向 NE 延伸, 进入上庄地段. 河东蚀变带受望儿山断裂控制, 其产状与断裂带基本一致, 上下盘围岩分别为黑云母花岗岩和花岗闪长岩, 蚀变带则由上述两种花岗岩经构造活动与热液蚀变作用叠加形成蚀变碎裂岩或绢英岩化花岗岩, 其下为绢英岩或黄铁绢英岩, 再向下依次为绢英岩化或黄铁绢英岩化花岗闪长质碎裂岩, 边部为绢英岩化花岗闪长岩. 金矿体即赋存于该蚀变带中.

成矿阶段: 第一成矿阶段, 侵染状黄铁石英脉, 金品位低, 通常是金矿石英脉的外带, 常常为非矿段或贫矿段, 富矿地段往往被第二阶段的块状石英黄铁矿交代过. 第二成矿阶段, 块状石英黄铁矿及磁黄铁矿阶段, 形成块状或稠密侵染状及斑杂状黄铁矿矿石, 一般发育在含矿断裂的张性膨大部位, 构成富矿的主体. 第三成矿阶段, 多金属硫化物阶段, 为富硫热液成矿, 以黄铁矿、方铅矿块状硫化物为主, 含有黄铜矿、闪锌矿、石英等, 该类矿石主要发育在石英脉的膨大富矿部位, 但多数在矿体的扬起端. 第四成矿阶段, 碳酸盐石英脉阶段, 脉体一般产出在矿体上部前缘的尖灭处, 常被剥蚀掉, 含金不够工业品位, 但在石英脉体中或两侧存在, 是良好的找矿标志.

在成矿作用同时, 石英脉两侧围岩普遍发生蚀变作用, 蚀变宽度达 3~ 5m, 甚至十几米, 一般对称发育, 具有明显的分带结构, 各带呈渐变过渡关系, 强度由内向外减弱. 空间上蚀变岩宽度有上宽下窄的总体趋势. 蚀变类型主要为黄铁绢英岩化、硅化 (内带), 中带是绿泥石化、碳酸盐化, 外带为红化. 围岩蚀变在矿区有大体一致的发育特征和规律性. 围岩蚀变是本区石英脉体两侧热液蚀变作用的普遍产物, 是否含有金的矿化或矿体, 蚀变岩的存在是必要条件.

3.3 成矿规律

根据前人的研究资料和笔者的科研成果, 本区成矿带在区域上存在着一定的规律性:

① 胶东地区的金矿带多分布在胶东隆起区, 沂沭大断裂的次级密集断裂带上. 燕山期 NE 向、NEE 向断裂构造在这些带上成组出现, 多次地质事件的叠加有利于含金热液的聚集成矿.

② 在区域上, 金矿化主要产出在混合花岗岩的混合岩化交代前锋带地段及混合花岗岩与胶东群和荆山群变质地层的过渡交接部位, 且偏于花岗岩一侧。

③ 含金石英脉、破碎硅化蚀变岩主要产于新华夏系和华夏系断裂中。充填此类断裂的含金石英脉成组出现, 近似等距分布, 在平面上呈右旋或左旋斜列式排布。金矿体的具体产出位置是断裂产状急剧变化的地段、主断裂下盘的次级断裂中、两组断裂的斜截或者压扭断裂的张性膨大部位。

④ 含金石英脉的主要地质标志是石英脉呈暗灰色, 其中有细粒黄铁矿化, 经常有时间上早或晚于石英脉的煌斑岩脉与之共生, 石英脉上下盘或上部尖灭部位一般发育有黄铁绢英岩化、绢英岩化、硅化、红化等蚀变岩石。

⑤ 地表残留的氧化铁帽是评价异常和找矿的重要标志之一。本区常见 4 种类型的铁帽, 反映矿化程度不同的石英脉特征。块状构造的褐铁矿铁帽, 是烟灰状或块状黄铁矿矿石氧化的产物, 含金量一般较高; 蜂窝状铁帽, 含有石英角砾, 由第二阶段稠密浸染状石英黄铁矿矿石氧化而成; 网脉状铁帽, 常伴有方铅矿等原生矿物, 是含多金属硫化物或方解石脉的石英黄铁矿矿石氧化的结果, 该铁帽含金量也比较高; 松散砖红色铁帽, 由含稀疏浸染状黄铁矿的硅化花岗岩风化而成, 如果没有明显的断裂破碎带, 对追踪找矿意义不大。

⑥ 脉石英中黄铁矿的标型特征对于异常评价非常重要, 不同标型特征的黄铁矿与石英脉的产出期次有直接联系。早期 (第一阶段) 石英脉中的黄铁矿呈黄白色, 立方体或五角十二面体晶形, 颗粒粗大, 稀疏浸染状分散在石英中, 含金量较低; 第二、三阶段成矿期石英脉中的黄铁矿颜色较深, 暗黄至黑色均有, 颗粒细小。上述两种标型黄铁矿具有标志金矿的意义。

⑦ 金等指示元素异常是第一阶段石英黄铁矿化的微观反应, 其异常一般沿 NE 向断裂或 NW 向韧性断裂发育, 呈条带状、长透镜状或扁豆状, 金元素的中、内带异常基本上圈定了矿化的位置。

⑧ 根据已知矿体的矿物组合特征, 指示元素应是一组能够指示赋金矿物及其伴生矿物的标型元素, 在本区有 Au Ag As Sb Sn Pb Zn Bi 等。中、大型矿体之上, 指示元素均能够反映异常, 而且相互吻合。而小型的矿体或矿化点, 异常元素组合经常缺少某几种指示元素。

3.4 1号矿体分带形态特征及深部预测

河东金矿由几个小矿体组成, 原勘查报告将其编为 1 2 3 4 5 号, 多数位于主断裂面的下盘, 其中 1 号矿体规模最大。现主要介绍 1 号矿体: 该矿体位于 154~ 178 线间, 走向 NE51°, 倾向 NW, 倾角 25~ 55°, 平均 33°, 平均品位 6.12×10^{-6} , 厚度 9m 左右。

通过对 1 号脉 - 5 - 25 - 80 和 - 110m 中段不同元素分析, 随着深度的增加, 微量元素 Pb Zn Bi Sb 含量增加, 说明矿体向深部有延伸趋势 (表 2)。

表 3 列出河东金矿 1 号脉 - 50 - 80 和 - 110m 三个中段分维值 (D)、几何丰度 (C) 和有效紧密度 (E) 随矿脉不同中段变化规律。从 - 50m 经 - 80m 至 - 110m 中段, 分维值 (D)、几何丰度 (C) 值和有效紧密度 (E) 值增加, 说明从 - 50m 经 - 80m 至 - 110m 中段矿脉平面面积逐渐增加, 且表现为矿脉由不规则状、有分支复合现象逐渐过渡到较规则状; 同时说明矿脉从 - 50m 经 - 80m 至 - 110m 储量也逐渐增加, 据此推测 - 140m 中段矿脉有更好

表 2 河东金矿 1号脉体不同中段微量元素变化 (10⁻⁶)

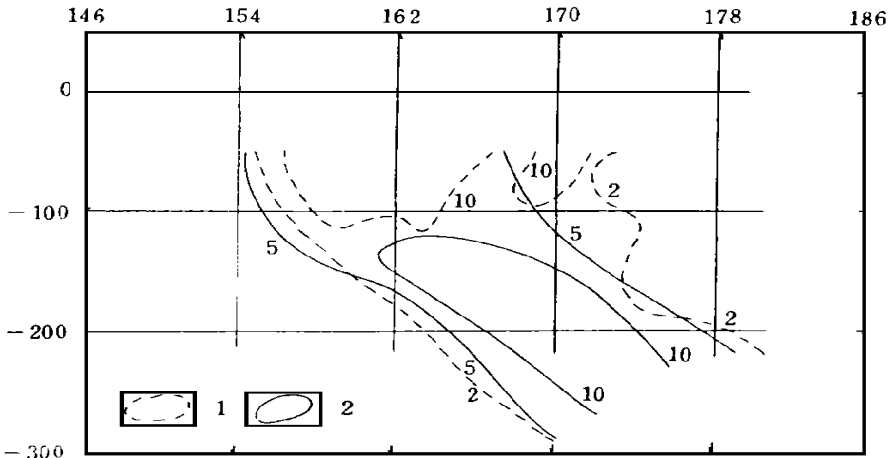
Table 2 Variation of the trace element in horizontal ore body of Hedong gold deposit

中段 (m)	Au	Ag	Zn	Bi	Sn	Pb	Sb	As
- 5	5	0. 55	48	0. 5	2. 3	33	6. 3	9. 7
- 25	25	0. 75	50	0. 8	2. 8	27	10. 7	8. 7
- 80	15	0. 50	89	1. 2	1. 2	184	56	8. 0
- 110	28	0. 70	112	1. 5	3. 2	214	66	8. 0

表 3 河东金矿 1号脉体不同中段 D C E 值变化规律

Table 3 Variation of the value of D, C and E in horizontal ore body of Hedong gold deposit

中段 (m)	分维数值 (D)	几何丰度值 (C)	有效紧密度 (E)
- 50	1. 18	0. 188	0. 7
- 80	1. 20	0. 192	0. 75
- 110	1. 25	0. 297	0. 80



比例尺 1: 5000

图 3 河东金矿 1号脉垂直纵投影品位厚度趋势

Fig. 3 Variation of grade with thickness in horizontal ore body at Hedong gold deposit
1- 厚度等值线 (thickness contour); 2- 品位等值线 (grade contour)

的资源前景 .

同时对河东金矿 1号脉 - 50 - 80 - 110m 中段进行金的品位和厚度研究 , 理论计算在 160~ 172线之间 , - 140和 - 170m 中段赋存 1~ 2t 平均品位大于 5×10^{-6} , 平均厚度大于 5m 的矿体 (图 3所示). 其中 - 140m 中段矿化远景地段已得到工程验证 , 黄金储量 1t 多 .

4 参考文献

1 Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature. New York: W. H. Freeman and Co., 1982.

- 2 Kaye B H 1992, 分形漫步. 徐新阳等译. 沈阳: 东北大学出版社, 1994.
- 3 Barnsley M F. 1987, 分形图形学. 和风译. 北京: 海洋出版社, 1995.
- 4 李洪志, 杨泓清. 金矿找矿与系统工程. 系统工程, 1994, 3 (12) .
- 5 李洪志, 杨泓清. 金矿找矿研究中的两种新对策. 河北地质学院学报, 1994, 17 (5) .
- 6 李洪志, 杨泓清. 黄金矿山深部及外围地质找矿的新对策. 矿山地质, 1995, 16 (1) .

FRACTAL DIMENSIONS OF GOLD-VEIN AND APPLICATIONS IN GOLD DEPOSIT PROSPECTING

Li Hongzhi

(*China University of Geosciences, Beijing*)

Song Yuguo

(*National Bureau of Gold Administration*)

Abstract

Fractal dimensions of gold-veins were analysed based on fractal dimensions (D), chunkiness (C) and compactness (E) of the gold-veins from different horizations of Lingshan gold deposit. An example for finding gold deposit was given to illustrate good application of geology and fractal dimensions method.

Key words fractal dimensions(D) chunkiness(C) compactness(E) gold-vein

作者简介 李洪志 男 1966年4月生, 1989年获成都地质学院矿产系学士学位, 1992年获中国地质大学(北京)地球化学专业硕士学位, 1995年获中国矿业大学北京研究生部工程测量专业博士学位, 现为中国地质大学(北京)地质矿产系博士后. 通讯地址: 北京市海淀区学院路29号; 邮政编码: 100083.