

文章编号: 0258-7106(2014)03-0596-11

# 黑龙江省逊克县高松山金矿床地质分形特征及成矿预测\*

庞文龙, 王艳忠, 陈桂虎, 薛继广, 韩冰, 张洪文, 郑大贺

(中国人民武装警察部队黄金第一支队, 黑龙江 牡丹江 157021)

**摘要** 高松山金矿床是中国人民武装警察部队黄金第一支队在小兴安岭-张广才岭成矿带北段发现的大型浅成低温热液矿床, 随着研究的深入, 发现其具有优越的成矿地质条件和良好的找矿前景。在总结前人成果的基础上, 文章利用分形学理论对金矿资源量和品位进行了分析, 结果显示资源量在大于 250 kg 标度区间时, 分维数  $D$  值为 1.69, 表明资源量在该区段内的普查存在较好的前景, 同时, 品位分维数  $D$  值为 1.10~1.40 时, 其成矿仅与细脉状烟灰色石英-细粒黄铁矿成矿阶段紧密相关。利用钻孔资料分析品位在垂向上的分形特征发现, 分维数  $D$  值介于 1~1.5 时, 表现为垂向不圈闭延伸, 反映其深部可能存在隐伏矿体。在资源评价方面, 通过对断裂构造似等距控矿规律的研究, 结合帕累托定律(Pareto law)和阻尼曲线模型, 对深部可能存在的矿体规模和部位进行了预测, 资源量大于 4960 kg 的矿体仍有 2 处未发现, 中等资源量规模的矿体存在巨大空间, 同时, 预测隐伏矿体可能在已有地表矿体相间部位的深部。

**关键词** 地质学, 高松山金矿床, 分形, 资源评价

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

## Geological fractal characteristics of Gaosongshan gold deposit in Heilongjiang and prognosis of mineral resources

PANG WenLong, WANG YanZhong, CHEN GuiHu, XUE JiGuang, HAN Bing, ZHANG HongWen and ZHENG DaHe

(No. 1 Gold Geological Party of CAPF, Mudanjiang 157021, Heilongjiang, China)

### Abstract

The Gaosongshan gold deposit, recently discovered by Gold Geological Party of CAPF, is a large-size epithermal gold deposit in the northern Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcail Mountain metallogenic belt. Deepening studies have revealed that it has superior metallogenic conditions and good ore-search prospect. Based on summarizing previous researches, the authors used the fractal theory to analyze resource quantity and grades of ore deposits, and the results show that when the resource quantity lies in the scale interval of more than 250 kg, dimension  $D = 1.69$ , which shows that there exists great prospect of ore prospecting in this segment; when the grade of fractal dimension  $D$  value is within the range of 1.10 to 1.40, the mineralization is only related to the ore-forming stage of veinlet ash-gray quartz-fine-grained pyrite. The use of drilling data to analyze the grade fractal characteristics in vertical direction revealed that, when the fractal dimension  $D$  values are in the range of 1~1.5, there exists vertical extensional trap, suggesting that the probable existence of a concealed orebody in

\* 本文得到中国地质调查局黑龙江省逊克县高松山矿区及外围金矿调查评价(编号: 1212011085231)项目和武警黄金指挥部黄金专项项目的共同资助

第一作者简介 庞文龙, 男, 1989年生, 学士, 工程师, 主要从事矿产地质勘查工作。Email: pwl01306320@126.com

收稿日期 2013-03-09; 改回日期 2014-04-21。秦思婷编辑。

the depth. In terms of resource evaluation, through the study of the equidistant ore-controlling regularity of the fracture structure in combination with Pareto (Pareto law) and damping curve model, the authors made a prognosis of the size and location of the possibly existent ore body. It is shown that two orebodies whose resource quantity is greater than 4960 kg have not been found, that there exists extensive space for the possible orebody with medium resource quantity, and that the concealed orebody may exist in the depth between the known surface orebodies.

**Key Words:** geology, Gaosongshan gold deposit, fractal, resource evaluation

分形理论创立于 20 世纪 70 年代中期,由法国数学家 Mandelbrot(1977)提出,其研究对象为自然界和社会活动中广泛存在的无序(无规则)而有自相似性的系统。该理论是以分维数、自相似性和幂函数等为工具,研究隐含于杂乱现象中的细微结构,为人们从局部认识整体、从无序认识有序,提供了崭新的思维和方法,为现代科学技术的发展提供了强有力的非线性理论。该理论在地球科学的诸多方面也有着广泛应用,如区域化探异常下限确定、矿床多期次矿化叠加、矿床远景储量预测等,人们借助分形理论来揭示地质现象的复杂程度,反映其自相似性特征。

高松山金矿床是一个大型浅成低温热液矿床,与团结沟、东安、平顶山等金矿床均位于小兴安岭-张广才岭成矿带北段。众多学者对其矿床地质特征(王艳忠等,2006;边红业等,2009)、矿床成因(刘桂阁等,2006)、地球化学特征(唐忠等,2010)等进行过研究,但对矿床的成矿规律和资源远景评价研究较少,制约着下一步的矿产勘查。因此,本文旨在通过分析矿床的资源量和金品位的分形特征,探讨其成矿规律和成矿期次,结合帕累托定律(Pareto law)和阻尼曲线模型,对深部可能存在的隐伏矿体规模和部位进行预测,为今后的勘查与资源潜力评价提供有价值的参考。

## 1 地质特征

### 1.1 区域地质背景

研究区位于天山-兴安造山系吉黑镶嵌地块中北部松花江地块、布列亚-佳木斯地块和张广才岭加里东造山带的交接地(韩振新等,2004)(图 1)。NNE 向牡丹江深大断裂纵贯区内东部,构成张广才岭加里东造山带和布列亚-佳木斯地块边界,主活动期为加里东期,具有缝合带性质。NE 向伊兰-伊通大断裂从区内南东侧通过,为郯城-庐江断裂之北段

分支之一,主活动期为中生代,总体显示右行走滑特征,对区内构造产生重要影响(任纪舜,2002)。

区内以元古界变质岩层为基底,在此基础上,中南部产生裂陷并于加里东期褶皱回返,形成张广才岭造山带,同时实现各地体的拼贴,形成统一的吉黑镶嵌地块。该区受加里东、华力西构造运动影响,岩浆活动强烈,大面积出露加里东期造山型花岗岩类侵入岩和印支期以碱性为主的后造山型花岗岩类侵入岩。燕山期以来,受近 NNE 向-SSW 向引张作用,区内岩石圈减薄,形成陆相断陷盆地,主要分布于北部,西侧为乌云盆地,东侧为嘉荫盆地,它们实质上是 NWW 向延伸的结雅盆地的南东缘。同时,燕山中晚期( $J_3-K_1$ )伴随多期次的以中基性为主的陆缘活化带型岩浆喷发和花岗岩类小岩体侵入活动。在盆地与隆起接触带、盆地内部次级隆起区,沿断裂构造带、火山机构激发热液流体活动,于有利的构造部位形成了团结沟、东安、高松山等与中酸性岩浆喷出和浅成、超浅成侵入活动有关的金矿床。喜马拉雅期该区北部及外围发育大陆裂谷型玄武岩,说明该时期岩石圈进一步伸展,裂陷深度加大。

### 1.2 金矿地质特征

高松山金矿床位于黑龙江伊春-延寿地槽褶皱带上,断裂和褶皱构造均较发育,其西侧是雪水温-沾河压扭性断裂,东侧是永青五七干校-高松山压扭性断裂,南侧是美丰河张性断裂,北侧是沙阿其河张性断裂及伴生断裂(图 1)。出露地层主要为下白垩统板子房组( $K_1b$ )、宁远村组( $K_1n$ )和第四系沉积。岩浆活动较明显,燕山期次英安岩及次安山岩,呈脉状侵入于火山碎屑岩、凝灰岩及流纹岩中。成矿与英安岩脉、安山岩脉密切联系,显示矿床与火山作用有亲缘关系;同时,构造活动经过多期发育,有较好的成矿构造环境。含金地质体可分为构造角砾岩和蚀变岩 2 类。围岩蚀变类型有硅化、绿泥石化、碳酸盐化、高岭土化,矿化类型有黄铁矿化、褐铁矿化。

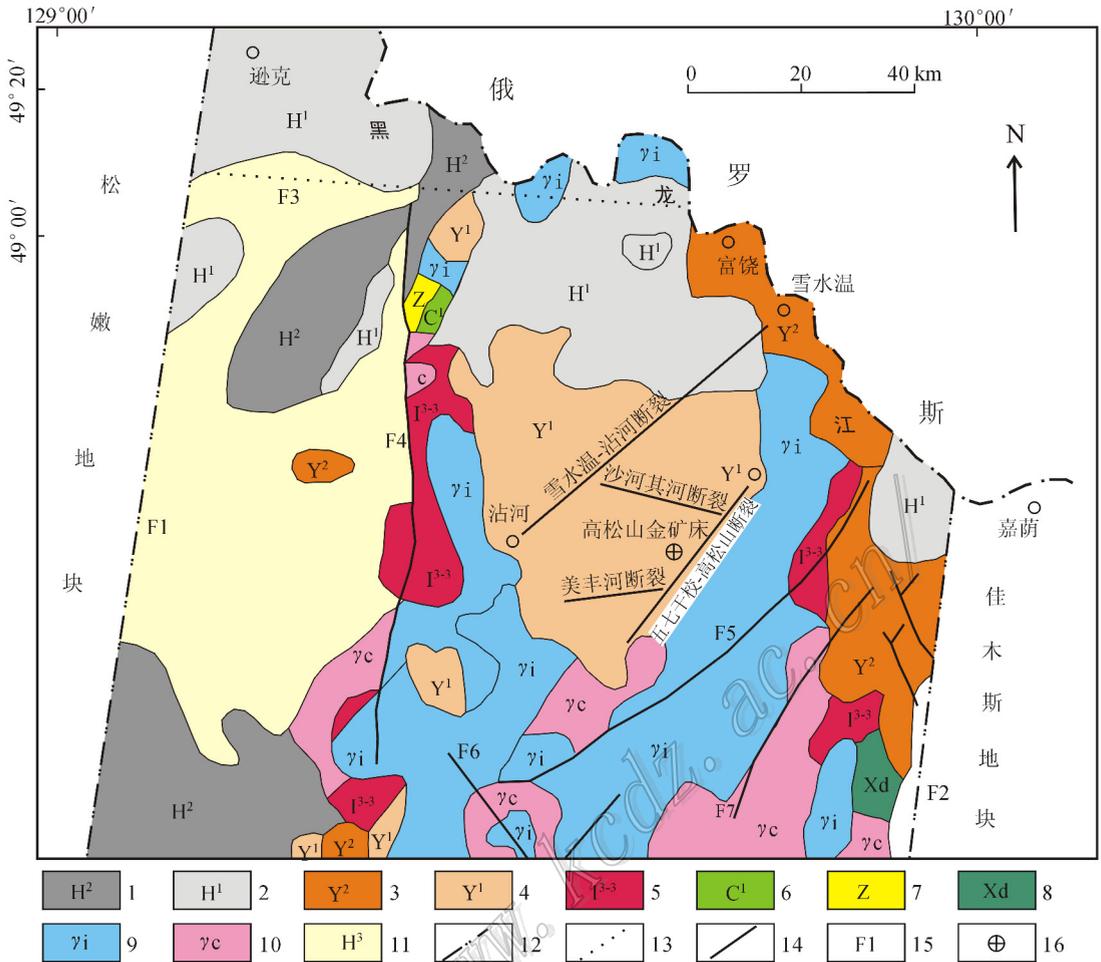


图1 小兴安岭张广才岭北段区域地质简图

1—喜马拉雅期第二亚构造层, N; 2—喜马拉雅期第一亚构造层,  $K_2^3-E$ ; 3—燕山期第二亚构造层,  $J_3-K_1^1$ ; 4—燕山期第一亚构造层,  $J_{1,2}$ ; 5—印支晚期第三亚构造层,  $T_3$ ; 6—早加里东期亚构造层; 7—张广才岭期构造层,  $P_2^3$ ; 8—兴东期构造层,  $P_{t1}$ ; 9—印支期花岗岩类; 10—加里东期花岗岩类; 11—喜马拉雅晚期玄武岩; 12—岩石圈断裂; 13—壳断裂; 14—区域断裂; 15—断裂编号; 16—金矿床  
 F1—逊河-铁力-尚志断裂; F2—牡丹江断裂; F3—逊河-乌云断裂; F4—库尔滨断裂; F5—乌伊岭断裂; F6—五营断裂; F7—铁力-东风断裂  
 Fig. 1 Regional geological sketch map of the northern Xiaoxing'anling-Zhangguangcai Mountain metallogenic belt  
 1—2nd Himalayan tectonic layer, N; 2—1st Himalayan tectonic layer,  $K_2^3-E$ ; 3—2nd Yanshanian tectonic layer,  $J_3-K_1^1$ ; 4—1st Yanshanian tectonic layer,  $J_{1,2}$ ; 5—3rd Indosinian tectonic layer,  $T_3$ ; 6—Early Caledonian tectonic layer; 7—Zhangguangcai Mountain period tectonic layer,  $P_2^3$ ; 8—Xingdong period tectonic layer,  $P_{t1}$ ; 9—Indosinian granitoid; 10—Caledonian granitoid; 11—Late Himalayan basalt; 12—Lithospheric fault; 13—Crust fault; 14—Regional fracture; 15—Fault serial number; 16—Gold deposit  
 F1—Xunhe-Tieli-Shangzhi fault; F2—Mudanjiang fault; F3—Xunhe-Wuyun fault; F4—Kuerbin fault; F5—Wuyiling fault; F6—Wuying fault; F7—Tieli-Dongfeng fault

矿区内已发现4条矿脉和12条工业矿体(图2)。矿物共生组合为贫硫化物的金-石英组合,按金矿床的成因分类,可归为浅成低温热液型,是火山作用过程中形成的火山期后热液矿床。

## 2 高松山金矿床地质分形特征

### 2.1 高松山金矿床资源量的分形特征

#### 2.1.1 模型建立

矿床储量规模分布的数学模型是根据矿床储量

的统计自相似性,应用概率统计方法建立模型,并通过模型及其分维值的数理分析,得出不同分维值的地质解释,从而进行矿产资源预测的定量评价(万丽等,2005)。

设某矿区分布有若干矿床  $N$ ,用矿床储量  $r$  作为度量尺度,则矿床储量为随机变量,设随机变量  $R$  的分布密度函数为  $f(r)$ ,储量大于  $r$  的概率记为  $P(r) = P(R \geq r)$ ,则

$$P(R \geq r) = \int_r^{+\infty} f(r) dr \quad (1)$$

由于储量规模分布具有自相似性,即标度不变

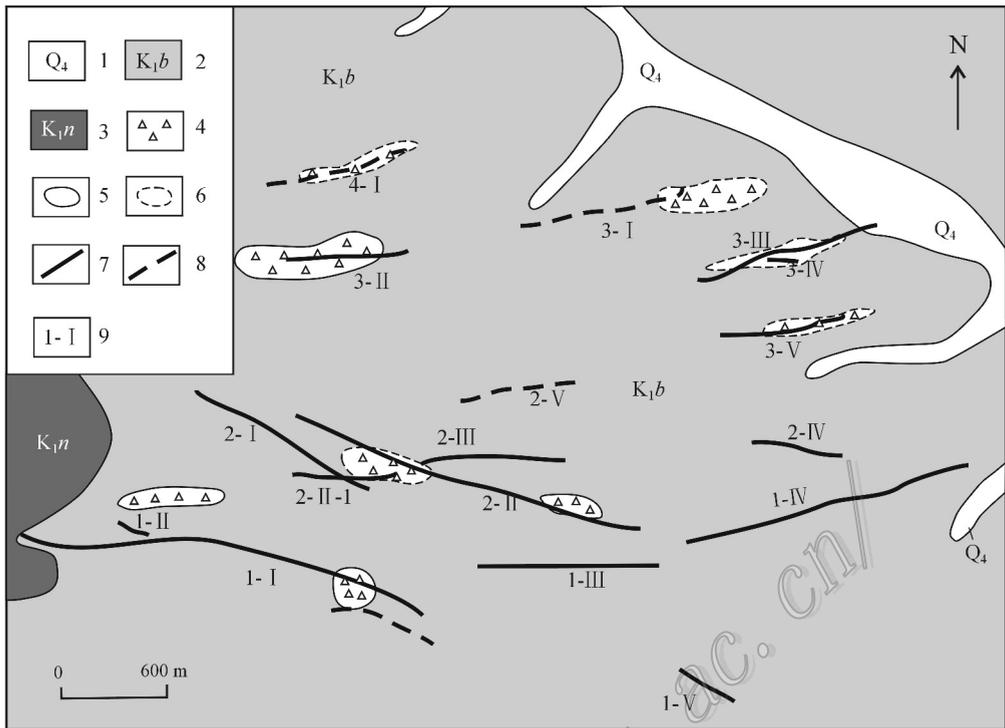


图 2 高松山金矿床地质及矿体分布图

1—第四系沉积物；2—下白垩统宁远村组酸性火山岩；3—下白垩统板子房组中基性火山岩；4—火山角砾岩；5—实测地质界线；6—推测地质界线；7—矿体；8—矿化体；9—矿(化)体编号

Fig. 2 Sketch geological map of the Gaosongshan gold deposit showing distribution of orebodies

1—Quaternary sediments; 2—Acidic volcanic rocks of Lower Cretaceous Ningyuancun Formation; 3—Acidic mafic volcanic rocks of Lower Cretaceous Banzifang Formation; 4—Volcanic breccias; 5—Measured geological boundary; 6—Inferred geological boundary; 7—Orebody; 8—Mineralized body; 9—Serial number of ore (mineralized) body

性,同时,满足(1)式的只可能是幂函数,考虑到  $P(r) \leq 1$ ,所以幂指数取负号,即  $P(r) \propto r^{-D}, D > 0$ 。

实际问题中,通常用频率近似代替概率。设已知区域的矿床总数为  $N_0$ ,大于储量  $r$ ,矿床累积数是  $N(\geq r) = N(r)$ ,则矿床累积数的频率为:

$$P(r) = N(\geq r) / N_0 \quad (2)$$

由此得出,  $N(\geq r) / N_0 \propto r^{-D}$ ,从而得出矿床储量规模的统计分形模型:

$$N(r) = N(\geq r) = Cr^{-D} \quad (3)$$

其中,  $r > 0; D > 0; C$  为常数;  $D$  为分维数。

由上式可得,  $r = [N(r)/C]^{-1/D}$ ,当  $N(r) = 1$ ,即储量大于  $r$  的矿床数为 1 时,  $r = (1/C)^{-1/D}$ ,应为最大储量,记为  $r_1$ ,即  $r_1 = C^{1/D}$ ;当  $N(r) = N_0$  时,  $r = (N_0/C)^{-1/D}$ ,应为最小储量,记为  $r_n$ ,即  $r_n = (C/N_0)^{1/D}$ 。两者相比得  $r_1/r_n = N_0^{1/D}$  和  $D = \ln N_0 / (\ln r_1 - \ln r_n)$ ,当区域矿床数  $N_0$  一定时,  $D$  越大,  $\ln r_1 - \ln r_n$  越小;  $D$  越小,则  $\ln r_1 - \ln r_n$  越大。

(1) 当  $D = 1$  时,有  $r_1 = C_1/D = C, r_1/r_n = N_0$ ,即  $r_1 = N_0 r_n$ ,说明最大储量恰好为最小储量与矿床总数之积。

(2) 当  $D > 1$  时,  $r_1/r_n = N_0^{1/D} < N_0$ ,说明矿床储量规模的分布相对比较集中,中间储量的矿床比较发育,储量等级就越集中。

(3) 当  $0 < D < 1$  时,  $r_1/r_n = N_0^{1/D} > N_0$ ,说明矿床储量规模的分布差异较大,分布相对分散,储量等级差越大。

(4) 当  $D \rightarrow \infty$  时,即  $r_1/r_n \rightarrow 1$ ,说明矿床储量规模趋于一致,规模的分布是均匀的。

(5) 当  $D \rightarrow 0$  时,即  $r_1/r_n \rightarrow \infty$ ,说明区域内只有一个矿床,为绝对的首位型的分布。

后两种情况在现实中一般很难出现。

分维数的确定可以通过双对数变换利用最小二乘法求出斜率  $D$  值。如果其落点分布在两条直线上,则需分段拟合,分别确定每段直线的斜率,即分

维数  $D_1$ 、 $D_2$  后,最优化法确定分界点,它是进行储量规模划分的重要参考依据。

### 2.1.2 高松山金矿床实例

高松山矿区已发现的主要矿床有1号矿脉、2号矿脉和3号矿脉。其中,1号矿脉有17个矿块、2号矿脉有4个矿块、3号矿脉有8个矿块(表1)。

从图3可以看出,资源量存在不同区段的多重分形,其分界点为2.4,说明资源量在小于250 kg标度区间, $D=0.01$ ,资源量规模的分布较均匀,分布变化不大;大于250 kg标度区间, $D=1.69$ ,说明资源量规模的分布较大,中间资源量的矿块比较发育,大资源的矿块普查仍存在较好前景。研究发现,自然界矿床储量-数量的分布存在分形的上限和下限,这些界线称为上分形限(LFL)和下分形限(UFL)

(图4)(李长江等,1999),它们是通常所说的最大矿床和最小矿床的储量分形特征,即高松山金矿床的资源量分形数据呈现上截断现象(图4),显示在高松山矿区,资源量小于250 kg的矿块有很大一部分尚未被发现。

## 2.2 高松山金矿床品位的分形特征

### 2.2.1 品位分形与成矿阶段

前人发现金的品位一般变化较大,分布极不均匀,不服从正态分布。因此,有学者运用分形理论研究其变化规律(魏一鸣等,1996),即利用分维数  $D$  表示金的分布偏离正态分布程度,分维数  $D$  值反映了多次矿化事件的叠加,为成矿期次的划分提供了依据。

表1 高松山金矿床矿块资源量统计表

Table 1 Statistics of ore block resources in the Gaosongshan gold deposit

项目	矿块编号									
		111	112	113	114	115	116	117	118	119
资源量/kg	610	646	292	1037	561	1165	480	923	254	213
项目	矿块编号									
		1111	1112	1113	121	122	123	131	211	212
资源量/kg	253	331	773	660	1945	42	681	29	542	917
项目	矿块编号									
		231	311	312	313	321	331	332	333	351
资源量/kg	331	301	136	336	773	88	318	84	267	

注:根据以上数据进行双对数变换统计,得到其不同无标度区间的分维数。

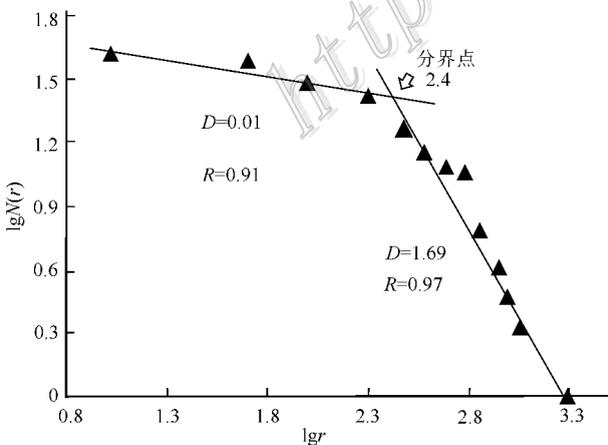


图3 高松山金矿床矿块资源量  $D$  值

Fig. 3 Fractal dimension of ore resources in the Gaosongshan gold deposit

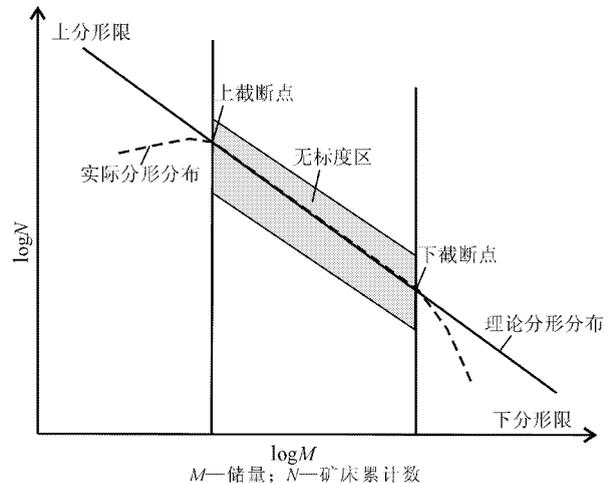


图4 矿床储量-数目关系双对数图解(李长江等,1999)

Fig. 4 Double logarithmic plot for deposit reserves-quantity(after Li et al., 1999)

笔者在野外工作的基础上,结合矿体特征、结构构造、围岩蚀变、脉体穿插等划分出 4 个成矿阶段:  
 ① 绿泥/帘石-黄铁矿(青磐岩化)-绢云母-伊利石-冰长石(?)阶段(Ⅰ);  
 ② 脉状、网脉状乳白色石英(Q1)-灰色微晶石英(玉髓)-黄铁矿(Au)阶段(Ⅱ);  
 ③ 细脉状烟灰色石英(Q2)-细粒黄铁矿(Au)阶段(Ⅲ);  
 ④ 乳白色石英、晶洞状石英(Q3)-碳酸盐-萤石阶段(Ⅳ)。

对各矿体 121 个金品位数据进行统计,分别就整体和 1、2、3 号矿脉数据进行双对数处理,求得分维数(图 5~图 8)。投点结果基本位于一条直线上,显示该矿体的品位具有良好的分形特征,其分维数  $D$  值介于 1.10~1.40,表明高松山金矿床各矿体的成矿阶段均为一期,从而说明Ⅲ阶段是该矿床最主要

的成矿阶段,其他阶段对成矿影响较小。其与中国其他金矿床相比,分维数  $D$  较低,也从侧面反映了成矿过程中成矿流体以大气降水为主(唐忠等 2010)。在火山作用下发生热液渗滤富集成矿过程,该阶段的成矿时间长,成矿过程缓慢,金品位较低且均一。

### 2.2.2 矿体垂向分形特征

从各矿脉品位分维数值来看,1 号矿脉较高( $D = 1.39$ )其资源量占总量的 40% 以上,为高松山金矿床的主矿体,同时,其工程控制程度达到详查阶段。因此,1-1 号矿体具有代表性,利用 Sufer 8.0 版软件针对其 38 个钻孔的金品位数据,先计算出金品位等值线图(图 9),然后统计各个钻孔、地表工程以及平面中段的金品位分维值计算等值线图(图 10)。

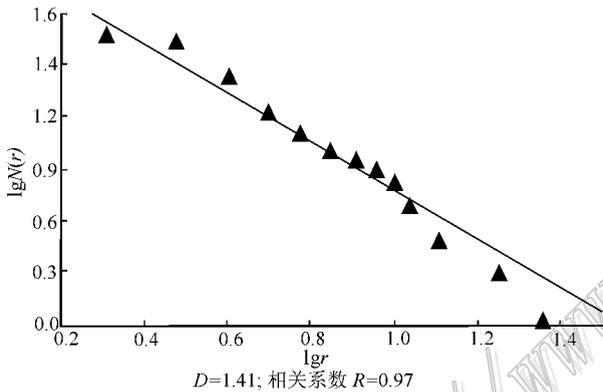


图 5 矿床整体品位-数目双对数图

Fig. 5 Double logarithmic plot for grade-quantity in the whole deposit

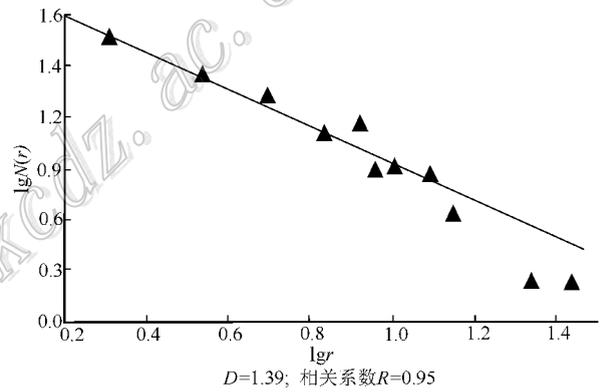


图 6 1 号矿脉品位-数目双对数图

Fig. 6 Double logarithmic plot for grade-quantity in No. 1 vein

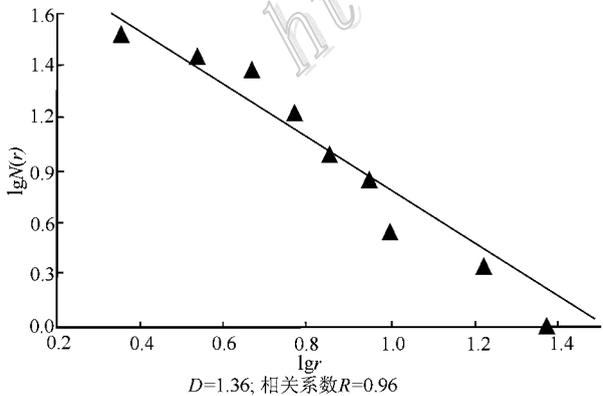


图 7 2 号矿脉品位-数目双对数图

Fig. 7 Double logarithmic plot for grade-quantity in No. 2 vein

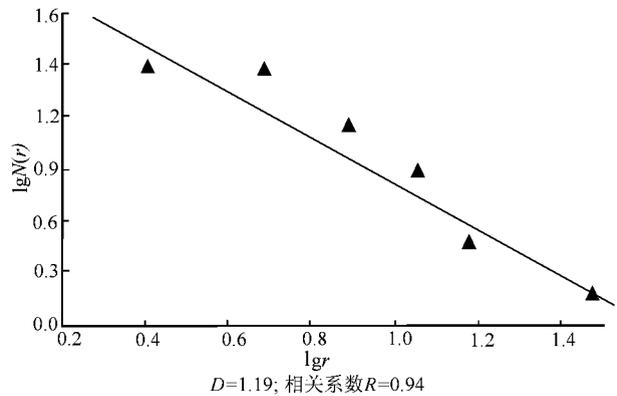


图 8 3 号矿脉品位-数目双对数图

Fig. 8 Double logarithmic plot for grade-quantity in No. 3 vein

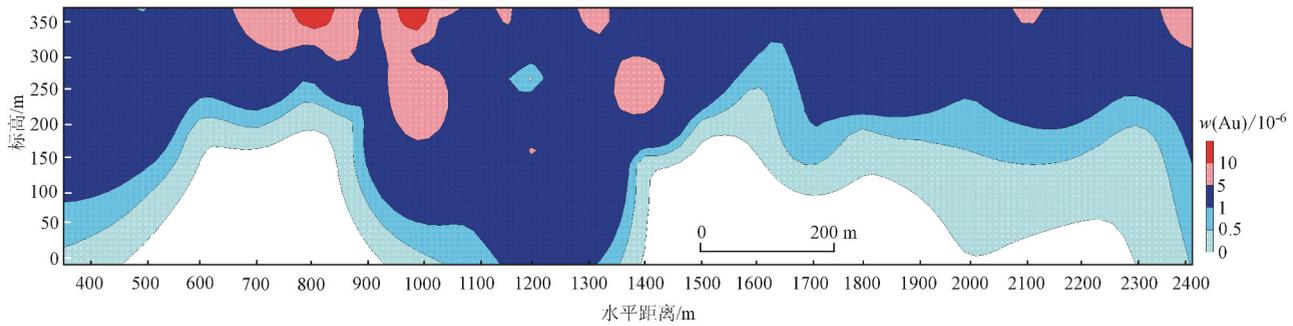


图9 1-I号矿体纵投影金元素等值线图

Fig. 9 Contour map for Au in vertical projection of No. 1-I ore deposit

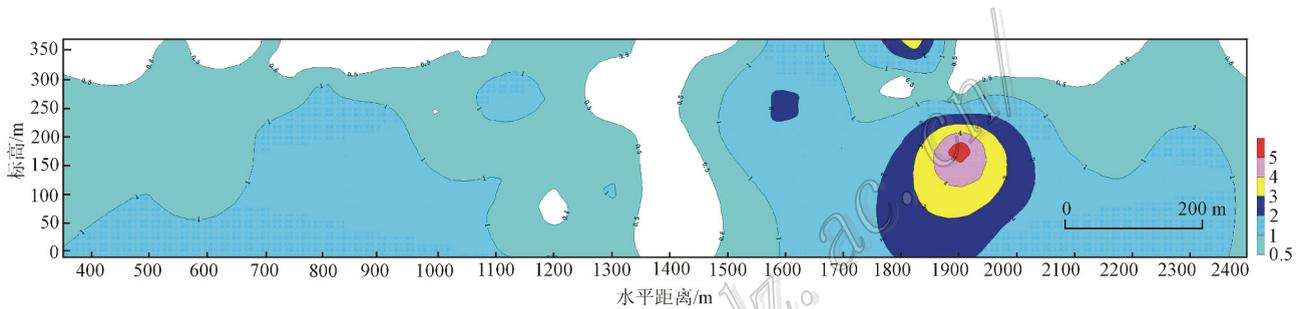


图10 1-I号矿体纵投影金元素分维值等值线图

Fig. 10 Contour map for Au fractal dimension in vertical projection of No. 1-I ore deposit

研究结果显示,金品位向下延伸逐渐降低(图9),矿体深部成矿强度可能逐渐减弱,但在金品位分维值介于0.5~2.0时(图10),显示出向深部延伸不圈闭的趋势。因此,推论在不同标高之间存在较大的成矿间断,深部可能存在隐伏矿体。通过以上分析,可以将分维值在不同平面的分布趋势作为深部成矿预测的依据。

### 3 高松山金矿床成矿预测

#### 3.1 高松山金矿床资源量评价

##### 3.1.1 帕累托定律(Pareto law)

帕累托定律由意大利经济学家、社会学家维弗雷多·帕累托(Vilfredo Pareto)研究提出的,是经济学中的重要概念,广泛应用于博弈论、工程学和社会科学中。该定律具有资料要求少、原理和过程分析简单等特点。

帕累托(Pareto)定律表达式如下:

$$\frac{Q_m}{Q_n} = \left[ \frac{n}{m} \right]^K \quad (4)$$

式中, $Q_m$ 、 $Q_n$ 代表序号为 $m$ 、 $n$ 的随机变量; $K$

为实数; $m$ 、 $n$ 为1,2,...整数序列中的任意数值,且 $m \neq n$ 。

Mandelbrot(1966)研究指出,帕累托分布(Pareto distribution)函数在低端截尾条件下具有分形不变性的分布性质,因此,可以在分形条件下利用该模型对尚未发现的矿体资源进行预测(申维,2008)。

因此, $Q_m$ 、 $Q_n$ 可代表第 $m$ 、 $n$ 个矿体的资源量, $K$ 可用统计矿体资源量得到的分维数 $D$ 值表达。

将已发现的矿体资源量由大到小排列,对其进行资源量-数目的分形统计,得出分维数 $D$ ,建立矿体规模序列后,设定一个最小矿体规模,通过 $D$ 值和最大矿体资源量可计算出矿区的总资源量。

##### 3.1.2 最大矿体资源量( $r_{\max}$ )和最小矿体资源量( $r_{\min}$ )的估算

矿床通常由多个矿体组成,它们的资源量规模符合分形分布,故可以通过矿体资源量的统计分形模型,推导出矿床的最大矿体资源量(万丽等,2007)。

由2.1.1节式(2)可得:

$$r = \left[ \frac{N(r)}{C} \right]^{-1/D} \quad (5)$$

当 $N(r) = 1$ ,即储量大于 $r$ 的矿体累积数为1

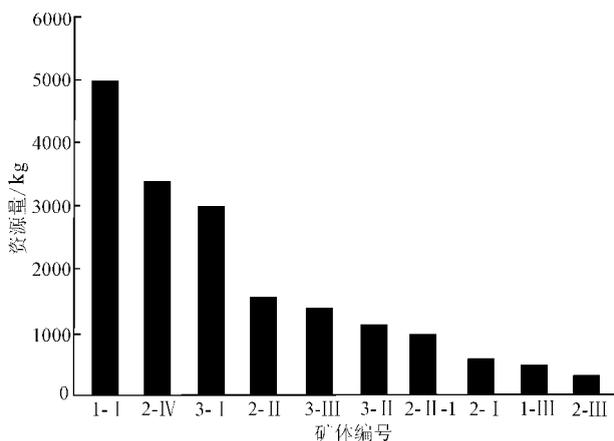


图 11 高松山金矿床矿体资源量排序图

Fig. 11 Sequence diagram for ore resources in the Gaosongshan gold deposit

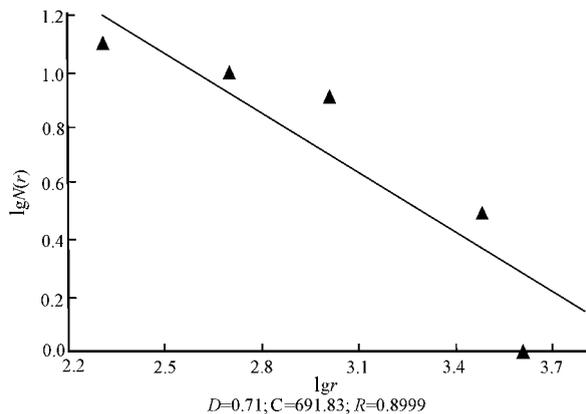


图 12 高松山金矿床矿体资源量 D 值

Fig. 12 Fractal dimension for ore resources in the Gaosongshan gold deposit

表 2 高松山金矿床矿体资源量规模序号预测对比表

Table 2 Comparison of scale serial number prediction for ore resources in the Gaosongshan gold deposit

序号	矿体编号	资源量/kg	归位序号	序号	矿体编号	资源量/kg	归位序号
1	1-I	4960	3	6	3-II	1037	24
2	2-IV	3391	5	7	2-II-1	917	29
3	3-I	3012	6	8	2-I	571	56
4	2-II	1526	14	9	1-III	445	80
5	3-III	1439	15	10	2-III	331	122

时  $r = [\frac{1}{C}]^{-1/D} = C^{-1/D}$  应为单个矿体资源量的最大值, 即  $r_{max} = C^{1/D}$ 。 $r_{min}$  为在当前工业指标下的最小可采资源量(对高松山金矿床取  $r_{min} = 200 \text{ kg}$ )。

### 3.1.3 高松山金矿床资源量评价

统计矿区已有各矿体资源量, 由大到小排列(图 11), 建立矿体现有规模的序列, 并对其进行资源量-数目的分形统计, 得出分维数  $D = 0.71, C = 691.83$ (图 12), 从而得出  $r_{max} = C^{1/D} \approx 9999.98 \text{ kg}$ 。

根据公式(4)得出最小矿体资源量( $r_{min}$ )排序为 247。同时, 将已发现矿体的资源量对应公式, 将得到资源量规模序号重新归位(表 2)。

由表 3 可知, 高松山金矿床资源量大于 4960 kg 的仍有 2 处未发现, 中等储量矿体寻找存在较大空间。同时, 由于最小矿体资源量排序为 247, 而现已找到矿体 10 处, 则其规模大于 200 kg 的矿体可能存在尚未发现的 237 个矿体(图 13)。

## 3.2 断裂构造控矿规律

### 3.2.1 矿区断裂构造基本特征

高松山金矿床的东、西两侧分别为雪水温-沾河

和永青-高松山压扭性断裂, 南、北两侧分别为美丰河和沙阿其河张性断裂(图 1)。金矿化与构造活动密切相关, 沙阿其河断裂是主要的导矿构造, 伴生的 NWW 向、NEE 向、EW 向断裂是主要的容矿构造(王艳忠等 2006)。

沙阿其河断裂总体呈北西-南东向展布, 倾向  $210^\circ$  延长 7 km, 张性正断层。其伴生构造主要为 NEE 向扭裂和 NWW 向张性断裂。其中, I 号断裂为 NEE 向, 长 1500 m, 宽 2~9 m, 走向  $70 \sim 90^\circ$ , 倾向南东, 为 I 号矿体的容矿构造。NWW 向张性断裂目前已发现多处, 产状为  $290 \sim 210^\circ / 80 \sim 85^\circ$ , 控制了 1、2、3 号矿脉的产出(表 3)。由于矿体富集于断裂内部, 主断裂的产状基本就是矿体的产状, 同时, 近 EW 向线状矿体的控矿构造存在多期次活动的特征, 而成矿期构造主要表现为沿原生节理叠加发育的张性构造特征, 张性构造派生共轭剪节理, 共轭剪节理内充填有石英细脉, 并有明金产出, 成矿期后构造主要表现为沿张性构造复合叠加压扭性断裂。

### 3.2.2 断裂构造对矿体空间分布的控制

对高松山金矿床矿体产出特征进行系统研究发

表3 高松山金矿床矿体特征

Table 3 Characteristics of gold orebody in the Gaosongshan gold deposit

矿体编号	产状		规模			平均金品位/ $10^{-6}$	资源量/kg
	倾向/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	长度/m	斜深/m	平均厚度/m		
1-I	205	64	2046	300	1.41	5.16	4960
1-II	200	70	400	250	2.13	9.89	1519
1-III	195	70	400	260	1.10	4.97	445
1-IV	170	78	1354	250	1.2	4.83	1031
2-I	205	75	1000	270	1.39	4.21	571
2-II	200	80	600	260	2.75	2.84	1526
2-II-1	355	85	700	240	0.72	7.47	917
2-III	170	80	300	150	0.93	4.2	331
2-IV	190	86	810	240	1.04	16.05	3391
3-I	170	65	750	150	1.35	5.84	3012
3-II	355	65	680	150	0.83	4.08	1037
3-III	260	80	550	140	2.32	2.45	1439

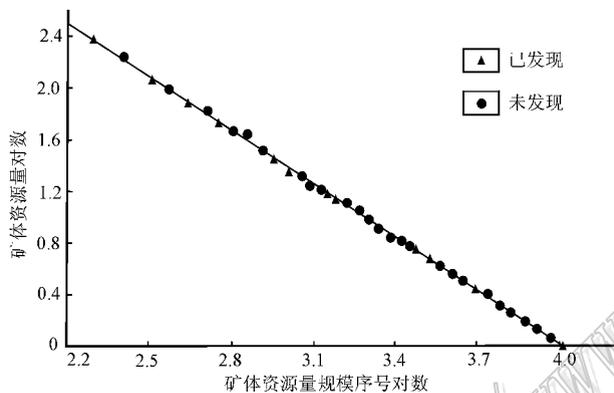


图13 高松山金矿床矿体规模序列

Fig. 13 Scale sequence for orebodies in the Gaosongshan gold deposit

现脉体之间的似等距性分布规律明显(图14)。NEE向矿体有4-I、3-I、3-II、3-III、3-V、1-IV号矿体,多呈400 m或其整倍数等距出现,大致成雁列平行展布,并与沙阿其河断裂成锐角相交。NW向矿体有1-I、1-II、2-I、2-II、2-IV号矿体,多呈400 m或其整倍等距出现,大致成雁列平行展布,矿体产于断裂带内(陈桂虎等,2013)。这主要是由于断裂具有剪切性质,应力以一定的波形传递,在波峰、波谷转换时,断裂面呈现波状起伏的展布特征,并使有利的成矿部位出现波状相间的似等距分布,从而控制矿体的似等距分布,而矿体间距与应力的主波长相近。

自然界中这种似等距性的规律,其运动形式为阻尼运动,在介质中运动的轨迹称为阻尼曲线(慕远江等,2002)。在研究高松山金矿床含矿特征时,笔者总结出以下特点:①矿体规模普遍较小,成群集中出现;②矿体群走向延长与倾斜延深近相等或成整

数倍;③地表矿走向近等距分布,间隔约为400 m;延深几乎在同一标高尖灭,约为300 m标高;④以最大的矿体为中心,两侧小矿体向中心侧伏。

高松山的最大矿体是1-I号矿体,走向延长约2046 m,倾斜延深约为300 m,从1-I矿体到含矿系统尖灭处距离约3000 m。以400 m×2为波长,以300 m×2为最大振幅,曲线方程为:

$$Y = H_0 \left( 1 - \frac{X}{L} \right) \cos \frac{2\pi X}{r} \quad (6)$$

式中, $H_0$ 为曲线最大振幅; $L$ 为曲线从最大振幅到尖灭处距离; $r$ 为曲线波长。

高松山金矿床的曲线方程为:

$$Y = 2 \times 300 \left( 1 - \frac{X}{3000} \right) \cos \frac{2\pi X}{2 \times 400} \quad (7)$$

将该方程置于矿区NNW向剖面图(图15)上,以最大矿体垂向中线为X轴,矿体出露最高标高(150 m)为Y轴。从图15中可见,几乎所有的浅部矿体都分布于曲线相邻两波峰之间0 m标高以上,并且由中心向两侧矿体的规模逐渐变小。根据波形相似原理,预测其深部隐伏矿体可能分布于相邻两波谷之间-150 m标高以下,与地表矿体成对称产出。

综上所述,下一步矿区深部找矿可以在已有地表矿体产状相平行的中间部位布设深钻,可能找到隐伏的矿体。

## 4 结论

(1)高松山金矿床资源量存在不同区段的多重分形, $\leq 250$  kg标度区间时, $D = 0.01$ ,表明该范围内

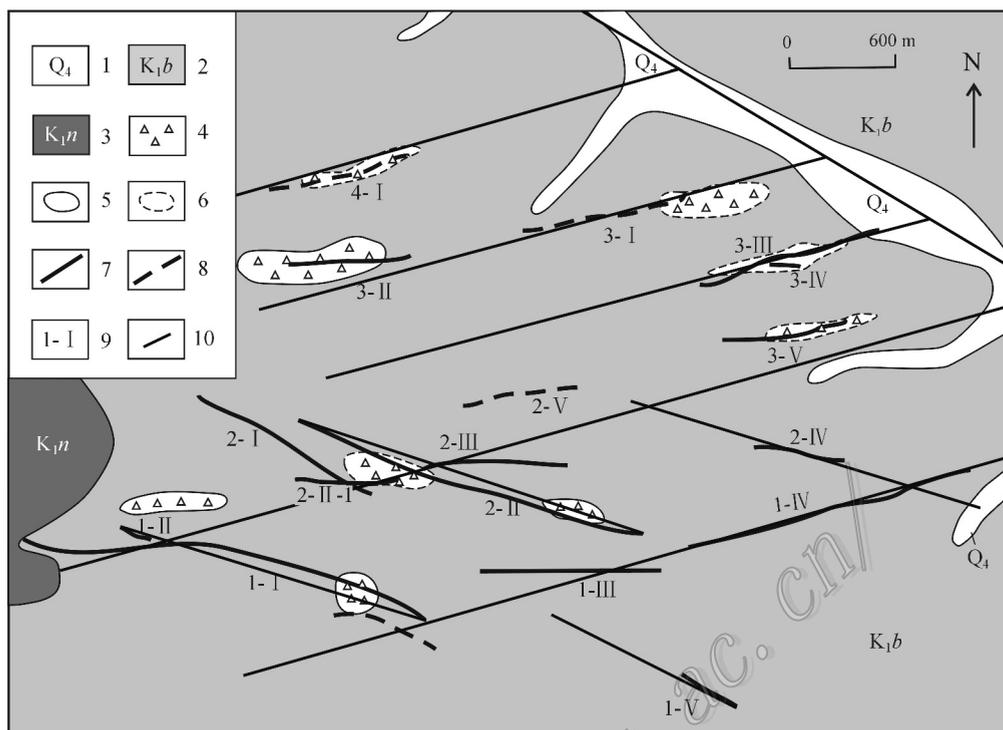


图 14 高松山金矿床脉体的似等距性分布图

1—第四系沉积物；2—下白垩统宁远村组酸性火山岩；3—下白垩统板子房组中基性火山岩；4—火山角砾岩；5—实测地质界线；6—推测地质界线；7—矿体；8—矿化体；9—矿(化)体编号；10—似等距线

Fig. 14 Distribution of isometric view of veins in the Gaosongshan gold deposit

1—Quaternary sediments; 2—Acidic volcanic rocks of Lower Cretaceous Ningyuancun Formation; 3—Acidic mafic volcanic rocks of Lower Cretaceous Banzifang Formation; 4—Volcanic breccias; 5—Measured geological boundary; 6—Inferred geological boundary; 7—Orebody; 8—Mineralized body; 9—Serial number of ore (mineralized) body; 10—Equidistance line

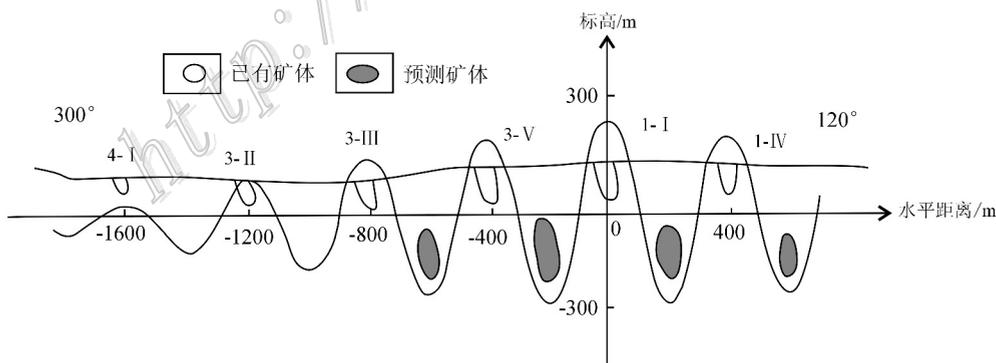


图 15 高松山金矿床矿体阻尼波形分布图

Fig. 15 Distribution of the damping curve in the Gaosongshan gold deposit

资源量规模分布较均匀，分布变化不大； $\geq 250$  kg 标度区间时， $D = 1.69$ ，表明该范围内资源量规模分布较大，中间资源量的矿块比较发育，大资源的矿块普查仍存在很大前景。

(2) 各矿体的金床品位分形特征反映了其分维

数  $D$  值介于  $1.10 \sim 1.40$ ，表明高松山金矿床各矿体成矿阶段均为同一期，即细脉状烟灰色石英(Q2)-细粒黄铁矿(Au)阶段，其他阶段对成矿影响较小。

(3) 利用 1- I 号矿体各探矿工程金品位数据，其分维值在矿体纵投影剖面上，显示出向深部延伸

不圈闭的趋势,推断在不同标高可能有较大的无矿间断,深部成矿潜力较大。

(4)利用帕累托定律(Pareto law)预测高松山金矿床尚未发现的矿体资源量,按规模序列,显示高松山金矿床资源量大于4960 kg的,仍有2处未发现,中等资源量规模矿体的寻找存在很大空间。

(5)高松山金矿床脉体呈似等距性分布规律,结合阻尼波形模型,预测其深部有隐伏矿体,可能分布于与有地表矿体产状相平行的中间深部,还需钻孔的验证。

#### 参考文献/References

边红业,陈满,刘洪利. 2009. 黑龙江省逊克县高松山金矿床地质特征及成因分析[J]. 地质与资源, 18(2): 91-95.

陈桂虎,王艳忠,庞文龙,佟志强,薛继广,赵洪海,尹西军. 2013. 黑龙江高松山金矿床地质特征及找矿前景分析[J]. 黄金, 34(1): 16-19.

韩振新,徐衍强,郑庆道. 2004. 黑龙江省重要金属和非金属矿产的成矿系列及其演化[M]. 哈尔滨:黑龙江人民出版社.

李长江,麻士华. 1999. 矿产勘查中分形、混沌与ANN[M]. 北京:地质出版社. 1-140.

刘桂阁,王恩德,常春郊. 2006. 黑龙江省逊克县高松山金矿成因探讨[J]. 有色矿冶, 22(4): 1-4.

綦远江,薄继,杨玉清. 2002. 齐波夫分布律与阻尼曲线在夹皮沟金矿田成矿预测中的应用[J]. 地质与勘探, 38(1): 35-39.

任纪舜. 2002. 论中国大陆岩石圈构造的基本特征[M]. 北京:地质出版社.

申维. 2008. 分形不变分布及其在山东地区金矿床中的应用[J]. 黄金, 15(7): 67-70.

唐忠,叶青松. 2010. 黑龙江逊克高松山金矿成因模式[J]. 世界地质, 29(3): 400-407.

万丽,邓军,王庆飞. 2005. 矿床储量规模分布的分形模型及其分维的数理分析[J]. 华南地质与矿产, 32(3): 35-37.

万丽,王庆飞. 2007. 极限资源量模型与应用[J]. 地质科技情报, 26(4): 8-10.

王艳忠,郎利国,余明军. 2006. 高松山金矿区地质、物化探特征及找矿方向[J]. 吉林地质, 25(2): 36-40.

魏一鸣,童光照. 1996. 矿床品位分布的分形特征研究[J]. 矿产研究与开发, 16(1): 1-4.

Mandelbrot B B. 1966. Forecasts of future prices, unbiased markes, and "martingale" model[J]. Journal of Business, University of Chicago, 39: 242-245.

Mandelbort B B. 1977. Fractals: Forms, chance and dimension[M]. San Francisco.