地质统计学在山东焦家金矿床深部含矿性预测中的应用

马田生[1]，寇铁勇[1]，阳正熙[2]，严 冰[2]
(1. 山西鲁能晋北铝业有限责任公司 矿山部，山西 原平 034100；
2. 成都理工大学 地球科学学院，成都 610059)

摘 要：运用地质统计学方法，对焦家金矿床的金品位、品位厚度乘积进行了系统研究，研究结果表明：焦家金矿Ⅰ，Ⅱ，Ⅱ号矿体的变程依次减小，反映其矿化连续性依次减弱；在垂向上 3 个主要矿体的连续性强弱交替出现。

关键词：地质统计学；成矿预测；焦家金矿；山东省
中图分类号：P628.2；P618.51 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-1412(2005)03-0176-06

1 矿床地质

焦家金矿床是招掖金矿带中最主要的金矿床之一。矿体产于 NNE 向破碎蚀变带中，受断裂构造的控制，围岩蚀变以钾化、黄铁绢英岩化、硅化、碳酸盐化为特征。

1.1 控矿构造

矿区以断裂构造为主，走向方位为 NNE-NE 向，是控制金矿的主体构造，包括焦家主干断裂和望儿山分支断裂以及其间次级的侯家断裂、鲍李断裂。

(1) 焦家主干断裂。龙口—莱州断裂经朱宋至朱桥地段我们称之为焦家断裂，焦家主干断裂属矿区Ⅰ级控矿断裂，纵贯全区，在矿区内长 1 900 m，宽 100～200 m，已探明最大延深 925 m。平面形态呈纺锤形，走向 10°～30°，倾向 NW，倾角较缓，一般 35°～45°，局部较陡(60°～70°)。

(2) 望儿山分支断裂。位于焦家矿区东南部，为焦家主干断裂在矿区内的分支断裂，属区内Ⅱ级构造，延伸 8.8 km，宽 3.0～50 m，斜深 800 余 m；该断裂倾向 NW，倾角 63°，在剖面方向与主干断裂构成“入”字型。

该断裂的主要特征是塑性变形不明显，构造岩主要为碎粒岩、碎裂岩及断层角砾岩，局部见糜棱岩。角砾呈现尖角状，常为多金属硫化物或石英脉胶结，石英脉常具梳状结构，且常有晶洞出现，说明该断裂的生成与张应力有关。在构造岩带的上部可见平整的滑动镜面，其上可观察到断层擦痕及阶步。该断裂具多期活动特征，断裂带内广泛发育尚未固结的断层泥以及常见多金属硫化物被错碎的现象，反映其成矿后再次活动。

(3) 侯家断裂。展布于焦家主干断裂与望儿山分支断裂之间，属矿区Ⅱ级构造。断裂长 3 000 m 左右，宽 20～40 m，走向 40°，倾向 NW，倾角 35°～45°。主要由碎裂岩组成，无明显构造裂面，破碎程度自 NE 向 SW 逐渐减弱。河西断裂是侯家断裂分支，长 1 000 余 m，宽 30～40 m。产状各段不一，东段走向 40°～50°，倾向 NW，倾角 25°～50°。

(4) 鲍李断裂。展布于焦家主干断裂与望儿山分支断裂之间，属矿区Ⅱ级构造。断裂长 3000 余 m，宽 20～30 m，最宽达百余米。走向 30°～40°，倾向 NW，倾角 70°左右，主要由碎裂岩组成。

1.2 围岩蚀变与矿化特征

矿区范围内围岩蚀变广泛发育，主要表现为钾长石化(红化)、黄铁绢英岩化、硅化、碳酸盐化等。蚀变的强度和规模取决与断裂、裂隙的性质和矿液脉动的强度。其特点是：蚀变作用延续的时间长，各蚀变作用相互重叠，蚀变分带明显，各蚀变带间为渐变关系。

收稿日期：2004-10-09； **修订日期**：2004-12-09

作者简介：马田生(1965-)，男，山西原平人，工程师，硕士，2004 年在成都理工大学地球科学学院获硕士学位，主要从事矿山地质勘探管理工作。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

矿化与蚀变作用有关,但主要取决于构造活动。矿床成矿作用可分为热液期和表生期,热液期又分 4 个阶段:I 黄铁矿-白色石英阶段、II金-灰色石英黄铁矿阶段、III金-石英多金属硫化物阶段、IV石英碳酸盐阶段;其中 II和 III是主要成矿阶段。矿体赋存于构造蚀变带中,矿石矿物组合中有氧化物、硫化物和碳酸盐。金属硫化物多呈浸染状、细脉浸染状和细脉、网脉状产出。主要载金矿物为黄铁矿。金的赋存状态以晶隙金和裂隙金为主,次为包体金。

1.3　破碎蚀变岩带地质特征

焦家金矿的主要地质特点是构造岩的围岩蚀变异常强烈。矿床产于焦家断裂中,主矿体呈似层状,厚数米,沿破碎带延长越千米,延深很大,矿体即为蚀变构造岩。在主断裂面下盘的构造岩(花岗质碎裂岩、碎粒岩)中蚀变带宽达 200 m 以上,蚀变带平均走向 30°,倾向 NW,倾角 25°～50°。主要蚀变类型有钾长石化、硅化、绢英岩化、黄铁矿化、碳酸盐化及绿泥石化。

1.4　矿体特征

I, II号矿体与主裂面产状基本一致,倾向 NW,倾角 25°～50°, III号矿体群共计 113 个矿体,倾向与主矿体相反(倾向 SE),倾角 50°～80°。

1.4.1　I号矿体

I号矿体为主矿体,储量占总储量的 70 %。I 号矿体以 I-1 号矿体为主,还包括 14 条与主矿体产状一致的规模较小的支矿体。

I-1 矿体分布于 56～152 线,赋存于主裂面之下,0～43 m 的黄铁绢英岩质碎裂岩带内,部分延至黄铁绢英岩化花岗岩带中。矿体呈似层状,沿走向及倾向呈舒缓波状延伸,有明显的分支复合、膨缩和尖灭再现,有时出现无矿天窗。产状与主裂面基本一致。走向 10°～40°,平均 30°,倾向 NW,倾角 25°～50°。其他支矿体规模较小,脉状或透镜状,产状与 I-1 号主矿体一致,分别赋存于 I-1 主矿体的上、下盘的黄铁绢英岩化斜长角闪岩和黄铁绢英岩化花岗岩带中。

1.4.2　II号矿体

平行展布于 I号矿体南东侧的黄铁绢英岩化花岗岩质碎裂岩和黄铁绢英岩化花岗岩中,距主裂面 14～69 m,56～128 线间,按其规模和分布,分为 II-1 号主矿体和其他支矿体。II-1 号主矿体地表断续长 340 m。总体看矿体呈半隐伏状,上部矿体较小,不连续,- 150 m 以下矿体规模增大,探明的最大斜深 400～600 m,脉状产出,走向 30°～40°,倾向 NW,倾角 30°。其他分支矿体分布于其上下盘。

1.4.3　III号矿体

矿体群赋存于 II号矿体南东侧 76～120 线,距主裂面 60～330 m 的黄铁绢英岩化花岗岩内,部分在钾化、红化花岗岩中,少数在黑云母花岗岩中,受张扭性节理裂隙带控制,具有延深、延长粗而短的特点。在中段图上(图 1)与 I, II号矿体大致平行,在剖面图上(图 2)与 I, II号矿体呈人字型有规律的排列。III-2 号矿体是 III号矿体群的主体,位于 95～111 线,主裂面下盘 35～45 m 距离内的黄铁绢英岩化花岗岩带内。由 17 个穿脉坑道控制,矿体呈脉状产出,局部有分支。走向 30°～50°,平均 36°,倾向 SE,倾角 78°～88°,平均 83°。

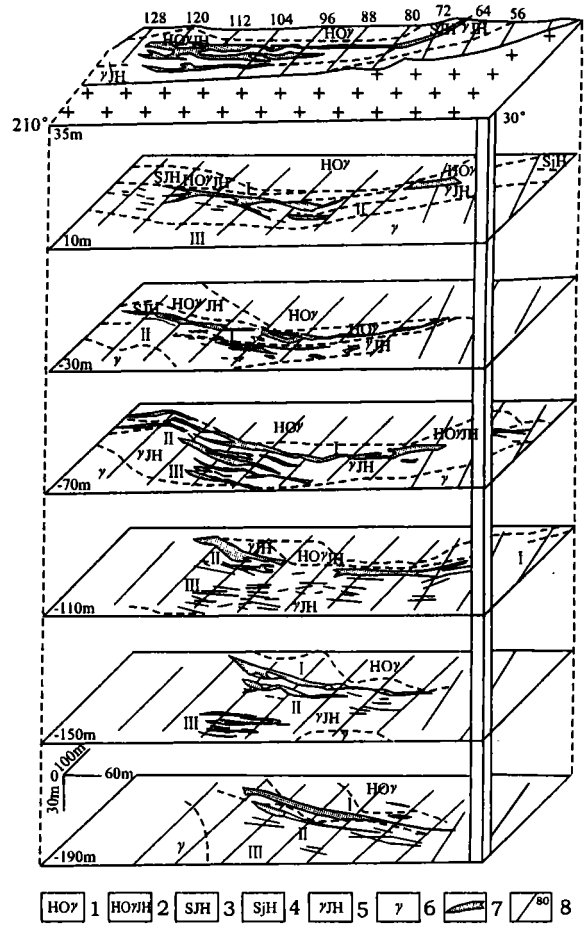


图 1　矿床水平断面联系图[2]

Fig. 1　The integrated horizontal section of Jiaojia Au deposit

1. 混合岩化斜长角闪岩　2. 黄铁绢英岩化斜长角闪岩　3. 黄铁绢英岩质碎裂岩　4. 黄铁绢英岩化花岗碎裂岩　5. 黄铁绢英岩化花岗岩　6. 黑云母花岗岩　7. 金矿体　8. 勘探线及编号

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

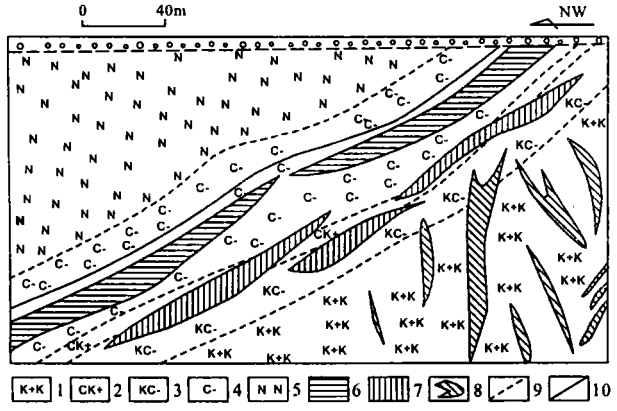


图 2 焦家金矿矿体分布特征示意图[2]

Fig. 2 Sketch showing ore body distribution in Jiaojia Au deposit

1. 钾质花岗岩 2. 黄铁绢英岩化钾质花岗岩 3. 钾质黄铁绢英岩 4. 黄铁绢英岩 5. 蚀变斜长角闪岩 6. I号矿体 7. II矿体 8. III矿床 9. 蚀变岩界线 10. 主断层面

2 地质统计学概述

地质统计学是 20 世纪 60 年代初期法国著名学者马特隆 G(Matheron G) 教授创立并发展起来的,它是数学地质领域内一个发展迅速且具有广阔应用前景的新兴学科。生产实践证明,地质统计学具有强大的生命力,它在地质科研、找矿勘探、采矿设计及矿山地质等领域日益显示出优越性,取得了一定的经济效益。地质统计学经过 40 年的发展,目前,已初步形成了一套较完整的理论体系,提出了一些重要的方法和技巧,编制了一套实际有效的程序包和程序库,建立了地质矿产数据库[3-9]。地质统计学是以区域化变量理论为基础,以变差函数为主要工具,研究在空间分布上既有随机性又有结构性的自然现象的科学。

3 实验变差函数的计算及变差图

实验变差函数是根据观测数据构造变差函数 $\gamma(h)$ 的估计值 $\gamma^*(h)$,在满足二阶平稳假设或本征假设的条件下,$Z(x)$ 的增量 $[Z(x) - Z(x+h)]$ 只依赖于分隔它们的 h(横轴方向),而不依赖于具体位置 x_0,这样,被向量分割的每一对数据 $\{Z(x_i), Z(x_i+h)\}$ $(i=1,2,\cdots N(h))$ 可以看成是 $\{Z(x), Z(x+h)\}$ 一次不同的实现(此处 $N(h)$ 是被向量 h 相隔的数据对的对数)。此时,可以根据在 x 轴上相隔为 h 的点对 x_i 和 x_i+h 上的观测值 $\{Z(x_i), Z(x_i+h)\}$ $(i=1,2,\cdots N(h))$ 用求 $\{Z(x_i) - Z(x_i+h)\}^2$ 的算术平均值的方法求 $\gamma^*(h)$,于是得到:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)}\sum_{i}^{N(h)}[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (1)$$

对不同的滞后距 h,根据上式可计算出相应的 $\gamma^*(h)$ 值来,对于每一个滞后距 h_i,把各点 $[h_i, \gamma^*(h_i)]$ 在 h - $\gamma^*(h_i)$ 图上标出,再将相邻的点用线段连接起来所得到的图形,即为实验变差图。

4 变差函数及结构分析

为了表征一个矿床或矿体地质变量的变化特征,经典统计学通常采用均值方差等参数,但这些量只能概括地质体某一特征的全貌,却无法反映其局部变化特征,以方差而言,它是随机变量与其均值之差平方的数学期望。方差大,表示所研究的变量在整个矿床(矿体)上的变化大;方差小,则反映其变化小。方差无法解决局部范围和特定方向上地质变量的变化特征,而变差函数能够很好地揭示地质变量在局部范围和特定方向上的变化特征。

在地质统计学中引入变差函数,它能够反映地质变量的空间变化特征:相关性和随机性,弥补了经典统计学的不足,特别是透过随机性反映区域化变量的结构性[10]。

5 实验变差函数的理论模型

为了对区域化变量的未知值作出估计,还需要将实验变差函数拟合成相应的理论变差函数模型,这些模型将直接参与克立格的储量估算以及其他估值。

常见的模型有球状模型、高斯模型等。

球状模型公式:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & r = 0 \\ C_0 + C\left(\frac{3}{2}\cdot\frac{r}{a} - \frac{1}{2}\cdot\frac{r^3}{a^3}\right) & 0 < r \le a \\ C_0 + C & r > a \end{cases}$$

其中:C_0 为块金常数;$C_0 + C$ 为基台值;C 为拱高;a 为变程。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

高斯模型公式:

$$\gamma(r) = C_0 + C(1 - e^{-(r^3/a^3)})$$

$$\text{其中变程} = \sqrt{3}a$$

模型中各个参数的含义:变程反映区域化变量的影响范围,块金常数反映的连续性,拱高是区域化变量的实验方差与块金常数之差。

6　变差函数在焦家金矿矿体变化性研究中的应用

7.1　Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ矿体平均变化性

7.1.1　原始数据的获取及数据处理

矿体的变化性质是指诸变量自身空间连续性程度及变化规律。本次研究运用变差函数及变差图来研究各个矿体的变化性质。焦家金矿经过多年的开采,有足够的工程揭露和矿体品位、厚度观测数据,具备了计算变差函数的条件。我们选用品位、厚度以及品位和厚度的乘积作为区域化变量进行矿体空间变化性研究。

数据获取方法:在各矿体的纵投影图上,取得对应矿体各中段(+10 m,-30 m,-70 m,-110 m,-150 m,-190 m 中段)的品位及厚度资料。

7.1.2　实验变差图及其拟合

品位、厚度、品位厚度乘积经对数变换后,利用 SURFER 软件求得走向各种不同距离的变差曲线,这些变差曲线都能用高斯模型拟合。品位厚度乘积经对数变换变差图(图 3)。原始数据对数变差图拟合参数见表 1。

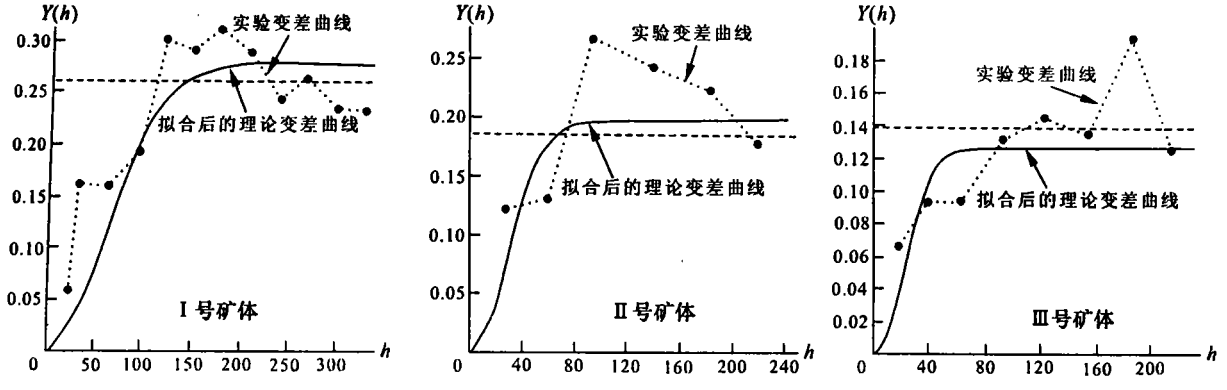


图 3　焦家金矿矿体走向方向品位厚度乘积变差图

Fig. 3　Product variation of grade and thickness along strike of ore body

表 1　原始数据对数变差图拟合参数

Table 1　Fit parameter for primitive data log variation

矿体编号	品位				厚度				品位×厚度			
	C_0	C	变程 a (m)	各向异性比率	C_0	C	变程 a (m)	各向异性比率	C_0	C	变程 a (m)	各向异性比率
Ⅰ	0	0.03159	19.59	1.9	0	0.2	104	2	0	0.277	104	2
Ⅱ	0	0.0852	236	2	0	0.14	86.4	2	0	0.1972	47.88	2
Ⅲ	0.02443	0.021	195	2	0	0.11	30.2	2	0	0.127	30	2

7.1.3　Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ号矿体变化性

由于矿体品位、厚度变化复杂,用其中某一变量建立变差函数来反映矿体变化性是不恰当的。故用品位和厚度两种变量乘积作为区域化变量,用此区域化变量建立变差函数来研究焦家金矿床Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ号矿体变化性。变差图参数 a 反映的是该方向上矿化连续的最大范围,从表 1 看,Ⅰ号矿体沿走向 a = 104 m,沿倾向 a = 52 m;Ⅱ号矿体沿走向 a = 47.88 m,沿倾向 a = 23.88 m;Ⅲ号矿体沿走向 a = 30 m,沿倾向 a = 15 m。这些说明Ⅰ号矿体沿走向矿化连

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

续的最大范围平均为 104 m,沿倾向平均为 52 m; Ⅱ号矿体沿走向矿化连续的最大范围平均为 47.88 m,沿倾向平均为 23.94 m; Ⅲ号矿体沿走向矿化连续的最大范围平均为 30 m,沿倾向平均为 15 m;同时也说明了矿体虽然受断裂构造控制,但矿化在空间上呈不连续分布特征,其中: Ⅰ号矿体连续性较好, Ⅲ号矿体连续性最差,这一计算规律与该矿床的开采资料完全吻合。

7.2 Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ号矿体垂向变化性

在矿山生产开采实践中,一个矿体是否具有工业开采价值,并不仅仅是由矿体矿石品位或厚度中某个单一因素所决定的,而往往是由矿体的品位及其厚度两方面决定的,矿体的品位越高,厚度越大,则矿体的工业价值也就越高。因此,排除地质体厚度极大或金品位极高等极端异常现象,在金矿体的范围内,各取样点的矿石品位与其厚度的乘积,一般能够比较客观地反映出该位置矿体的工业价值,即矿化程度的高低,可信度要比单一的厚度或品位的可信度为高。此乘积携带了矿体富矿段的有关信息,利用计算机处理系统所得到的金矿体矿化强度变化趋势图,能够在垂向上完全直观地反映出矿体各部分的矿化连续程度,可直观地看到矿体富矿段的分布格局。

对于大多数岩金矿而言,无论是石英脉型还是蚀变岩型金矿,矿体往往是赋存在线性断裂构造蚀变带内,平面上呈脉状,剖面上都呈板状。因此,获得了矿体在垂向剖面上的变化规律,也就能够比较全面地掌握金矿体在二维甚至三维空间内的变化规律,从而为深部隐伏金矿的成矿定位预测提供了重要的信息[11]。

为了解 Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ号矿体垂向变化规律,我们分别作了 Ⅰ号矿体 + 10～ - 190 m, Ⅱ, Ⅲ号矿体 + 10 m～ - 150 m 中段品位乘厚度走向方向变差图,并根据矿体各向异性比计算了沿倾向方向的变程,变差图理论模型特征参数见表 2。

表 2 各矿体中段理论模型特征参数

Table 2 Characteristic parametre of the theoretical model for levels of each ore body

中段高程	Ⅰ号矿体				Ⅱ号矿体				Ⅲ号矿体			
	沿走向			沿倾向	沿走向			沿倾向	沿走向			沿倾向
	C_0	C	a(m)	a(m)	C_0	C	a(m)	a(m)	C_0	C	a(m)	a(m)
+ 10m	0	0.3272	1.518	1.518	0	0.2354	32.16	21.51	0	0.333	13.2	6.6
- 30 m	0	0.339	392	196	0	0.22	54.6	27.3	0	0.2472	7.635	3.82
- 70 m	0	0.376	33.77	19.89	0	0.231	33.9	16.95	0	0.254	15.5	7.75
- 110 m	0	0.405	56	28	0	0.2822	34.73	22.36	0	0.2392	8.105	4.05
- 150 m	0	0.405	56	28	0	0.2211	10.24	5.12	0	0.2289	8.086	5.18
- 190 m	0	0.3272	1.518	1.518								

从 Ⅰ号矿体各中段品位乘厚度变差参数看,该矿体不仅沿走向、倾向具有矿化不均匀分布和集中分布规律,而且在垂向上也有矿化连续的最大范围呈现由小 →大 →小 →大 →小的变化旋回,表明 - 30m, - 110m, - 150m 中段矿化连续性好,而其他地段矿化连续性相对较差。

Ⅱ号矿体从 - 30m～ - 110 m 段矿化连续性好,在 - 150 m 中段矿化连续性相对较差。Ⅲ号矿体各中段品位乘厚度变差参数看,变程由地表浅部至深部,呈现由大 →小 →大 →小的变化旋回,表明 + 10 m, - 70 m 段矿化连续性好,在其他地段矿化连续性相对较差。

矿化的这种相对富集规律对深部矿体的预测具有重要指导意义。

参考文献:

[1] 山东省地质矿产局第六地质队,山东黄金集团有限公司焦家金矿.山东省莱州市焦家金矿床地质勘探-生产勘探总结报告[M].济南:山东测绘出版社,1997.

[2] 田农.山东焦家蚀变岩型金矿地质地球化学特征[J].中国地质科学院矿床地质研究所所刊,1988,(1):125-137.

[3] 王仁铎.地质统计学的发展趋势[J].地质科技情报,1996,15(2):49-102.

[4] 王仁铎,胡光道.线性地质统计学.[M]北京;地质出版社,1998.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[5] 候景儒,郭光裕.矿床统计预测及地质统计学理论的应用[M].北京:冶金工业出版社,1993.
[6] 候景儒.中国地质统计学(空间信息统计学)发展的回顾与前景[J].地质与勘探,1997,33(1):53-58.
[7] 候景儒.地质统计学发展现状及对若干问题的讨论[J].黄金地质,1996,2(1):1-11.
[8] 方维萱,刘方杰,程顺有.初论信息技术与我国有色金属矿产勘查与开发[J].有色金属矿产与勘查,1999,8(6):627-632.
[9] 向永生,孙爱云.地质统计学在金矿中应用及其发展方向[M],北京:冶金工业出版社,1998.
[10] 孙洪泉.地质统计学及其应用[M].徐州:中国矿业大学出版社,1990.
[11] 邹为雷,沈远超,曾庆栋,等.牟平金矿深部矿体赋存规律及找矿预测[J].黄金,2000,21(11):1-6.

APPLICATION OF GEOSTATISTICS TO METALLOGENIC PREDICTION AT DEPTH IN JIAOJIA GOLD DEPOSIT, SHANDONG

MA Tian-sheng[1], KOU Yi-Yong[1], YANG Zheng-Xi[2], YAN Bing[2]

(1. *Lu Neng Aluminum Industry Limited Liability Company Mineral mountain department North In ShanXi Province, Yuanping* 034100, *China;*
2. *College of Earth Sciences Chengdu University of technology, Chengdu* 610059, *China)*

Abstract: Au grade and produet of the grade and thickness of Jiaojia Au deposit is analysed geostatistically and systematically. The results show that variation range from No. Ⅱ to No. Ⅲ ore bodies is reduced reflecting their wetak mineralization continuation and alternated vertical weakness of the mineralization.

Key words: geostatistics; metallogenic prediction; Jiaojia gold deposit; Shandong province

欢迎订阅 2006 年《地质找矿论丛》

《地质找矿论丛》为国家科技部和新闻出版总署批准,由中钢集团天津地质研究院主办的地学科技期刊,于 1986 年创刊,国内外公开发行。中国标准刊号:ISSN 1001 - 1412,CN 12 - 1131/ P。

《地质找矿论丛》是中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)、《中国学术期刊综合评价数据库》和《中国科学引文数据库》来源期刊,并已成为国际权威文摘刊物美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》收录期刊。期刊同时全文入编《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《万方数据系统科技期刊群》、《中文科技期刊数据库》和《华艺 CEPS 中文电子期刊》等电子出版物和数据库,以多种媒体方式向读者提供服务。

《地质找矿论丛》主要报道矿产成矿理论与成矿预测、物质成分及综合利用、矿产地质勘查新技术新方法及其应用、地学信息技术、水文地质与工程地质、环境地质调查与治理、资源勘查工程、矿产品深加工技术、地质矿产技术经济等方面的科研成果、进展评介、研究简报,并不断开拓报道领域与深度。

《地质找矿论丛》面向从事地质科研、矿产勘查、矿山企业、矿产品开发的科技人员和地学院校师生。热忱欢迎地矿行业、地学院校、文献信息部门的单位和个人踊跃订阅并投稿。

《地质找矿论丛》为季刊;每期 72 页,A4 国际开本,每季度末月出版;每期定价 5.00 元,全年共计 20.00 元。

订阅办法:

(1)向《地质找矿论丛》编辑部函索订单订阅,订购款通过邮局汇款。

编辑部地址:天津市河西区友谊路 42 号　中钢集团天津地质研究院《地质找矿论丛》编辑部
邮政编码:300061　　**联系人**:王书辉
联系电话:022 - 28367243　　**E - mail**:luncong @yeah. net

(2)通过"全国非邮发报刊联合发行部"订阅。

地　址:天津市大寺泉集北里别墅 17 号(300385)
电　话:022 - 23973378;23962479　　**传　真**:022 - 23973378
E - mail:L HZD @public. tpt. tj. cn　　**网　址**: www. L HZD. com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net