

· 方法与应用 ·

文章编号: 1002-4182(2000) 01-0049-05

# 灰色 GM(1, 1)模型应用于金矿床 定量预测研究及其效果评析

王可勇, 杨梅珍, 孙建和

(中国地质大学 黄金研究所, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 介绍了灰色 GM(1, 1)模型基本原理及建模程序, 列举了该模型应用于金矿床深部定量成矿预测研究的 3 个具体实例, 通过对预测结果的综合对比分析, 认为矿体自身变化程度及模型本身单调性函数特征是影响预测精度的主要因素, 提出了矿体变化程度及规律研究是有效应用 GM(1, 1)模型进行成功预测的前提和基础。

**关键词:** 灰色 GM(1, 1)模型; 定量预测; 金矿床; 效果评析

**文献标识号:** A

**中图分类号:** P618.51; P612; P628.1

矿床深部及外围大比例尺成矿预测研究是当前地质找矿工作的一项重要任务, 而矿体的定位及定量预测则是其关键所在及核心内容。这种定位及定量预测难度大, 实践性及探索性较强。80年代末以来, 灰色系统理论开始引入这一研究领域。灰色 GM(1, 1)预测模型以其数据量要求少、计算方便简单及预测精度较高等优点被认为是解决大比例尺定量成矿预测的一种有效途径, 已在一些矿区深部成矿远景预测实际工作中得到了具体应用, 并初见成效<sup>[1, 2]</sup>。本文拟通过几个研究实例, 对该方法的预测效果及其影响因素进行评析。

## 1 基本原理与方法

灰色 GM 模型是灰色系统理论中常用的预测模型。所谓灰色系统, 即指部分信息已知, 部分信息未知的系统, 它在自然界和社会领域中普遍存在。地质科学的各个研究领域所涉及到的各种对象在一定程度上均属于灰色系统。灰色系统理论的一个基本观点是: 一切随机量都可看作是在一定范围内变化的灰色量。对灰色量的处置不是找概率分布, 求统计规律, 而是通过数据生成来寻找数据间的规律, 根据对生成数据建模实现预测目的。常用的数据生成方式有累加生成、累减生成及映射生成等 3 种。灰色 GM(1, 1)模型即是最常用的单变量一次累加生成预测模型<sup>[3]</sup>, 其建模步骤及预测过程可归纳为:

### (1) 确定预测指标 (变量) 序列

$$x^{(0)} = [x^{(0)}_1, x^{(0)}_2, \dots, x^{(0)}_n]$$

其中  $i = 1, 2, \dots, n$

### (2) 计算 1 次累加生成数据序列 (1-AGO)

$$x^{(1)}_i = [x^{(1)}_1, x^{(1)}_2, \dots, x^{(1)}_n]$$

其中

$$x^{(1)}_i = \sum_{k=1}^i x^{(0)}_k$$

$i = 1, 2, \dots, n$

### (3) 构造累加矩阵 B

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} [x^{(1)}_1 + x^{(1)}_2] & 1 \\ -\frac{1}{2} [x^{(1)}_2 + x^{(1)}_3] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2} [x^{(1)}_{n-1} + x^{(1)}_n] & 1 \end{bmatrix}$$

### (4) 利用最小二乘法则求 $\hat{a}$

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N$$

其中

$$Y_N = [x^{(0)}_2, x^{(0)}_3, \dots, x^{(0)}_n]$$

### (5) 建立预测模型方程并进行预测

$$\hat{x}^{(1)}_{(k+1)} = (x^{(0)}_1 - \frac{1}{a}) e^{-ak} + \frac{1}{a}$$

其中  $k = 1, 2, \dots, j$  ( $j \geq n$ )

当  $k = 1, 2, \dots, n-1$  时, 上式计算值用于对预测模型精度的检验; 当  $k \geq n$  时, 上式计算值即为对未来时刻变量的预测值。

## 2 应用研究实例

对已知矿体深部成矿远景开展预测评价研究, 是

矿山地质找矿及探矿工作的重要环节。除可利用各种有利找矿标志及其组合对其进行定性评价外,灰色GM(1,1)模型可用来对深部矿体特征进行定量预测。常用预测指标有矿体长度、品位及厚度等。一般做法是首先根据钻孔或坑道等工程揭露情况,自浅而深近等间距取得矿体长度、品位及厚度等特征值,从而构成原始数据序列;再通过数据生成处理,建立灰色GM(1,1)预测模型,进而对深部矿体矿化指标进行预测。现举3例加以说明。

2.1 河南枪马金矿床

枪马金矿床是河南灵宝市重要金矿床之一,其最大生产矿脉为410脉,全长1780 m,走向近南北,倾向东,倾角70~80°。目前在该矿脉内已圈定出6个工业矿体,其中IV号为主矿体,其他矿体规模相对较小。在

对该矿脉深部成矿远景预测评价工作中,我们选择IV号矿体,采用灰色GM(1,1)模型对其深部矿化情况进行研究。根据已有探矿坑道揭露情况,取得IV号矿体在1848 m、1806 m、1769 m、1730 m、1692 m及1610 m等标高处的长度、厚度及品位值,构成原始数据序列(表1)。通过数据生成处理及建模,分别得到矿体长度、厚度及品位的GM(1,1)预测模型如(1)~(3)式。

$$\hat{x}^{(1)}_1(k+1) = 3610.283e^{-0.053k} - 3385.283 \tag{1}$$

$$\hat{x}^{(1)}_2(k+1) = -22.33e^{-0.0984k} + 24.39 \tag{2}$$

$$\hat{x}^{(1)}_3(k+1) = -103.44235e^{-0.281k} + 120.14235 \tag{3}$$

据其对该矿体在1570 m及1530 m标高处的长度、厚度及品位进行预测,结果见表1。

表 1 枪马 410脉IV号矿体深部矿化情况 预测结果  
Table 1 The prognostic results of deep level mineralization of No.IV ore body of vein No. 410 in Qiangma gold deposit

| 序号<br>(k) | 标高<br>/m | 矿 体 长 度 /m |       |       | 矿 体 均 厚 /m |       |       | 矿体平均品位 /10 <sup>-6</sup> |       |       |
|-----------|----------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|
|           |          | 计算值        | 实际值   | 残差 /% | 计算值        | 实际值   | 残差 /% | 计算值                      | 实际值   | 残差 /% |
| 1         | 1848     | 225        | 225   | 0     | 2.065      | 2.065 | 0     | 16.7                     | 16.7  | 0     |
| 2         | 1806     | 196.51     | 152.5 | -28.9 | 2.088      | 2.01  | -3.88 | 25.39                    | 30    | 15.5  |
| 3         | 1769     | 207.2      | 281.5 | 26.4  | 1.9        | 1.74  | -9.19 | 19.13                    | 10.92 | -7.5  |
| 4         | 1730     | 218.49     | 216   | -1.15 | 1.721      | 2.25  | 23.5  | 14.45                    | 13.82 | -4.7  |
| 5         | 1692     | 230.36     | 230   | -0.16 | 1.56       | 1.16  | -34.5 | 10.91                    | 16.12 | 32    |
| 6         | 1650     | 242.9      |       |       | 1.41       |       |       | 8.23                     |       |       |
| 7         | 1610     | 256.13     | 185   | -38.4 | 1.28       | 0.99  | -29.3 | 6.72                     | 8.35  | 25.5  |
| 8         | 1570     | 270.1      |       |       | 1.16       |       |       | 4.69                     |       |       |
| 9         | 1530     | 284.71     |       |       | 1.05       |       |       | 3.55                     |       |       |

计算结果表明,对矿体长度、厚度及品位预测结果的残差大部分在±20%以内,少量偏高,可达±30%左右;在1570 m及1530 m标高处,矿体长度、厚度及品位预测值分别为270.1~284.77 m、1.052~1.16 m及3.55×10<sup>-6</sup>~4.69×10<sup>-6</sup>,说明IV号矿体深部仍有矿体存在,是找矿有利地段。最近探矿结果在1570 m中段已揭露较好的矿化。

2.2 山东招掖金矿带某矿床<sup>[1]</sup>

招掖金矿带某矿床规模中等,据已有工程求得其Ⅲ号矿体在+40 m、+25 m、+10 m、-5 m及-20 m各高程处的矿体长度、平均厚度及平均品位数值(表2),现需预测深部-35 m及-50 m处该矿体矿化情况。根据灰色GM(1,1)预测模型建模程度,分别建立该矿体长度、平均厚度及平均品位3项指标预测方程

(4)~(6)式。

$$\hat{x}^{(1)}_4(k+1) = 3326.223564e^{0.050327k} - 3261.223564 \tag{4}$$

$$\hat{x}^{(1)}_5(k+1) = 115.5177362e^{0.078646805k} - 106.2877362 \tag{5}$$

$$\hat{x}^{(1)}_6(k+1) = -212.5184848e^{-0.029926553k} + 218.6384848 \tag{6}$$

其预测结果表明该矿体向深部长度及均厚都有增大趋势,而矿石平均品位呈降低趋势,总体来看,在-35~-50 m标高范围矿化情况较好(表2)。新开掘的-50 m中段坑道已见到长222 m,均厚13.25 m,平均品位为5.4×10<sup>-6</sup>的较大矿体。与实际值相比,各指标预测误差分别仅为0.54%、5.74%及0.18%,表明上述预测模型精度较高,预测结果可靠。

表 2 招掖金矿带某矿床Ⅲ号矿体深部矿化预测结果

Table 2 The prognostic results of deep level mineralization of No.Ⅲ ore body of one deposit in Zhao-Ye gold metallogenic belt

| 序号<br>(k) | 标高<br>/m | 矿 体 长 度 /m |       |        | 矿 体 均 厚 /m |       |       | 矿体平均品位 /10 <sup>-6</sup> |      |        |
|-----------|----------|------------|-------|--------|------------|-------|-------|--------------------------|------|--------|
|           |          | 计算值        | 实际值   | 残差 /%  | 计算值        | 实际值   | 残差 /% | 计算值                      | 实际值  | 残差 /%  |
| 1         | + 40     | 65         | 65    | 0      | 9.23       | 9.23  | 0     | 6.12                     | 6.12 | 0      |
| 2         | + 25     | 171.7      | 175.7 | 2.28   | 9.45       | 9.60  | 1.56  | 6.27                     | 6.35 | 1.26   |
| 3         | + 10     | 180.5      | 180   | - 0.27 | 10.23      | 10.25 | 0.20  | 6.08                     | 6.75 | 9.93   |
| 4         | - 5      | 189.9      | 180   | - 5.5  | 11.06      | 13.41 | 17.52 | 5.9                      | 5.63 | - 4.80 |
| 5         | - 20     | 198.9      | 206.3 | 3.59   | 11.97      | 11.77 | - 1.7 | 5.73                     | 5.98 | 4.18   |
| 6         | - 35     | 207.9      |       |        | 12.95      |       |       | 5.55                     |      |        |
| 7         | - 50     | 216.8      |       |        | 14.01      |       |       | 5.40                     |      |        |

2.3 冀西北水晶屯金矿床<sup>[2]</sup>

水晶屯金矿床Ⅷ号矿脉为该矿床主要矿脉之一，全长约 4.5 km，走向近东西，南倾，倾角在 70°左右。据工程揭露情况，获取该矿脉 3号勘探线剖面位置 1270 m、1220 m、1170 m及 1120 m各高程处矿体品位及厚度数据（表 3）。根据灰色 GM(1, 1)模型建模程序，计算得到该矿脉品位、厚度预测方程如（7）、（8）式。

$$\hat{x}_7^{(1)}(k+1) = -131.5623e^{-0.0425k} + 148.7823 \quad (7)$$

$$\hat{x}_8^{(1)}(k+1) = 6.7506e^{-0.1420k} + 3.3106 \quad (8)$$

据其对矿脉 3号勘探线深部 1070 m及 1020 m高程处的矿化情况进行预测，结果（表 3）表明该矿脉向深部厚度增大，品位略有降低。经工程证实，在 3号勘探线深部已见到厚约 2.05 m的工业矿体。

3 预测效果及影响因素分析

通过利用灰色 GM(1, 1)模型进行矿脉深部成矿远景定量预测研究的 3个具体实例，不难发现，该方法作为一种递推型近程定量预测模型具有一定的精

度，预测结果基本正确可靠。在地质找矿及勘探阶段，利用该模型的预测结果择优选择先期探矿地段，合理布置探矿工程，对提高找矿经济效益具有重要的实际意义。同时，也应看到，该方法毕竟是建立在少量数据基础之上的纯数学模型，而自然成矿作用过程的影响因素则是繁杂多样的。因此，该模型的预测结果与实际情况往往存在一定偏差，有时这种误差还比较大，如例 1中最高误差达 - 38.4%。初步研究认为，影响灰色 GM(1, 1)模型预测效果的主要因素有以下几个方面：

（1）矿体变化性

矿体自身变化程度对该模型预测结果有明显影响。由表 1~ 3数据及图 1、2分析可以发现，矿体变化程度大的地段，预测误差也相对较大；而矿化相对稳定地段，预测误差则相对较小。对比研究也可以看出，招掖金矿带某矿床Ⅲ号矿体总体变化程度小，其深部预测结果误差偏小，多在± 10%以内（表 2、图 2）；而枪马金矿床 410脉Ⅳ号矿体，矿化垂向上具跳跃性变化特点，相邻中段间矿化变化程度大，因而其

表 3 水晶屯金矿Ⅷ号矿脉深部矿化预测结果

Table 3 The prognostic results of deep level mineralization of No.Ⅷ ore vein in Shuijingtun gold deposit

| 序 号 (k) |                      | 1     | 2      | 3      | 4     | 5    | 6    |
|---------|----------------------|-------|--------|--------|-------|------|------|
| 标高 /m   |                      | 1270  | 1220   | 1170   | 1120  | 1070 | 1020 |
| 实际值     | 品位 /10 <sup>-6</sup> | 17.22 | 5.21   | 5.80   | 4.74  |      |      |
|         | 厚度 /m                | 3.44  | 1.20   | 0.90   | 1.50  |      |      |
| 计算值     | 品位 /10 <sup>-6</sup> | 17.22 | 5.47   | 5.51   | 4.74  | 4.82 | 4.62 |
|         | 厚度 /m                | 3.44  | 1.03   | 1.02   | 1.49  | 1.56 | 1.82 |
| 残差 /%   | 品位                   | 0     | + 4.9  | - 5.0  | 0     |      |      |
|         | 厚度                   | 0     | - 14.2 | + 13.3 | - 0.6 |      |      |

残差一栏系本文根据原文数据补充计算

预测结果总体误差较大,多在 $\pm 10\%$ 以上,最高达 $-38.4\%$ 。就同一矿床而言,矿体长度、厚度及品位3项指标变化程度不一。预测结果的对比分析表明,对于变化程度小的指标,其预测精度相对较高。如招掖金矿带某矿床III号矿体长度较厚度及品位稳定,因此,对长度的预测误差多小于 $\pm 5\%$ ,而厚度及品位预测误差最高达 $10\%$ 以上;枪马金矿床410脉IV号矿体厚度指标变化程度小于长度及品位指标,其预测精度同样好于长度及品位的预测结果(表1,图1)。

### (2) 模型函数的单调性

灰色GM(1,1)模型是以生成数据为基础而建立的定量数学模型,其本身为一单调递增或单调递减函数。从预测结果表1~3及图1~2分析可以发现,尽管矿体各项指标具随机跳跃性变化特点,但其预测结果无一例外均呈逐渐降低或增高的单调性变化趋势。因此,预测模型本身的单调性变化特点与矿体各指标实际跳跃式变化特征不一致也是造成预测误差的重要原因之一。对于具单调性变化趋势的矿化指标,该模型预测效果要明显好于随机性变化较强的指标,如例2中III号矿体长度的预测效果优于厚度及品位指标,即说明了这一点(图2,表2)。

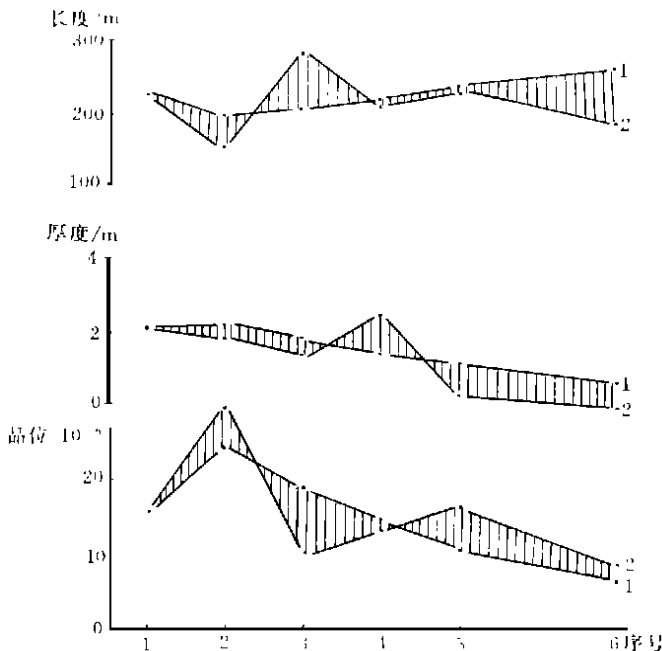


图1 枪马金矿410脉IV号矿体预测结果与实际值对比曲线

Fig. 1 The comparative curves between prognostic results and real values of No. IV ore body of vein No. 410 in Qiangma gold deposit

### (3) 模型函数参数值的非整数性

各实例中得到的预测方法均含非整数性参数,其取值亦是影响预测精度的一个因素。一般而言,小数位选取多少,对预测结果及精度都有一定影响,但总体来看,这不是决定其预测效果的实质性因素。

综上所述,模型本身的单调性函数特征及矿体自身的变化程度是影响灰色GM(1,1)模型预测效果的主要因素。从这一前提出发,在应用该模型进行定量预测评价工作之前,应首先对工程揭露地段矿体变化性特征进行充分的研究。在摸清矿体变化规律的基础上,通过对原始数据序列进行适当的取舍处理,或对矿体头、中、尾部不同地段分别建模研究,使其更好符合模型本身单调性函数变化趋势,从而达到更好的预测效果,为矿床深部地质找矿工作提供更可靠的依据。

## 4 结 论

灰色GM(1,1)预测模型是一种数据量要求少,计算方便简单而又有一定精度的实用型定量预测模型,其预测效果取决于矿体变化程度及模型本身单调性特点。对于矿体变化较稳定或趋势性变化较强的指

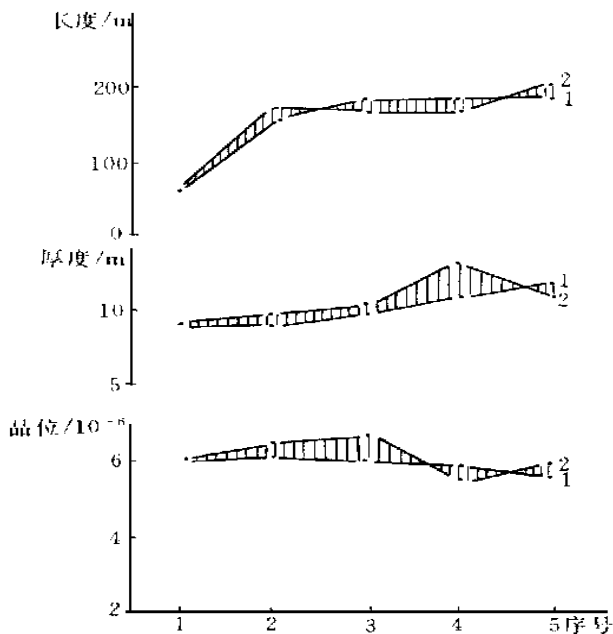


图2 招掖金矿带某矿床III号矿体预测结果与实际值对比曲线

Fig. 2 The comparative curves between prognostic results and real values of No. IV ore body of one gold deposit in Zhao-Ye gold mineralization belt

标, 使用该模型预测效果较好; 而对于矿体变化程度大, 或随机性变化较强的指标, 该模型预测效果相对差些, 在这种情况下, 可以通过对矿体变化规律的研究, 对原始数据序列进行适当取舍处理, 使之更好符合模型本身单调性变化特征之要求, 才能达到较理想的预测效果。

## 5 参考文献

- 1 程小久. 金矿床矿体深部变化性预测方法 [J]. 地质与勘探, 1990, 26 (1).
- 2 魏俊浩. 金矿床深部预测方法 [J]. 黄金地质科技, 1993, (3).
- 3 邓聚龙. 灰色系统基本方法 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987.

# APPLICATION OF GREY MODEL GM(1, 1) TO QUANTITATIVE METALLOGENIC PROGNOSIS OF GOLD DEPOSITS AND ITS RESULT APPRAISAL

WANG Ke-yong, YANG Mei-zhen, SUN Jian-he  
(China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract** By a brief introduction to the fundamental principle and construction procedure of Grey Model GM(1, 1), three examples are listed about applying this model to deep level quantitative metallogenic prognosis of gold deposits. After a comprehensive comparison and analysis of the prospecting results, it is concluded that the variation degree of ore body itself, and monotonous function feature of the model are main factors that influence the prognostic precision. The study on the variation degree and regularity of ore body is the premise and base for effective prognosis with GM(1, 1) model.

**Key words** grey model GM(1, 1); quantitative prognosis; gold deposit; effect appraisal

**作者简介:** 王可勇, 男, 讲师, 硕士, 1991年毕业于中国地质大学(武汉), 现从事金矿床地质、成矿规律及成矿预测研究工作。通讯地址: 长春市建设街 79 号 长春科技大学地学院资源系 矿床室, 邮政编码 130061。