

文章编号: 0258-7106(2007)03-0341-05

# 典型构造蚀变岩型金矿远景资源量数学模型与预测\*

王庆飞<sup>1,2</sup>, 万丽<sup>1,3</sup>, 刘学飞<sup>1,2</sup>

(1 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2 中国地质大学岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083; 3 广州大学数学与信息科学学院, 广东 广州 510006)

**摘要** 数学模型是矿床深部资源量量化预测一个重要手段, 其中品位-吨位模型是一个广泛应用的数学模型, 在该模型中, 远景资源量为研究区源岩中成矿元素总量的函数。利用该模型, 计算胶东构造蚀变岩型金矿远景资源量时, 发现由于成矿源岩范围难以确定, 而使模型应用准确性受到制约。基于断裂带蚀变岩型金矿的特征, 修正了品位-吨位模型。在修正后的模型中, 远景资源量为蚀变岩总质量的函数, 另包括3个参数: 蚀变区元素背景含量(由多标度分形决定)、元素工业品位及矿体品位分布分维值。利用修正后的品位-吨位模型, 有效地估算了胶东大尹格庄金矿-1000 m 以上的理想金属量, 得出远景矿石量为  $5.26 \times 10^7$  t, 金属量为  $2.89 \times 10^5$  kg, 与实际地质情况相吻合。

**关键词** 地质学; 品位-吨位模型; 蚀变岩; 分形模型; 胶东矿集区  
中图分类号: P628.029 文献标识码: A

## Mathematical modeling and estimation of reserves of typical structural altered rock type gold deposit

WANG QingFei<sup>1,2</sup>, WAN Li<sup>1,3</sup> and LIU XueFei<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Lithoprobeing Technology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 School of Mathematics and Information Science, Guangzhou University, Guangzhou 510405, Guangdong, China)

### Abstract

Mathematical modeling is an important approach to estimating the deposit reserves, and the grade-tonnage model is widely applied. In the model, the ideal reserves are constrained by the following four parameters: the total element mass of the source rock ( $M_0$ ), regional background value of element ( $C_0$ ), mean production grade of element ( $C$ ), and fractal dimension of the grade and tonnage ( $D$ ). During the application of the to the reserve estimation of the Dayin gezhuang deposit, a typical structural altered rock type deposit in the Jiaodong ore cluster area, the authors found that the application was restricted due to the difficulty in defining the boundaries of the source rock. Based on basic features of the structural altered rock type deposit, the authors modified the grade-tonnage model so as to make an effective prediction of the reserves of the deposit. In the modified model, the same four parameters are endowed with different meanings:  $M_0$  is the total mass of altered rock,  $C$  is the mean element production-grade,  $C_0$  is the element background value in the altered rock area estimated by the

\* 本文得到国家自然科学基金项目( No. 40572063 )、教育部跨世纪人才培养计划、地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金资助项目( GPMR0528、0529 )和中国博士后科学基金( 2005038361 )联合资助

第一作者简介 王庆飞, 男, 1978年生, 博士后, 现主要研究方向为构造-流体-成矿系统动力学。

收稿日期 2006-07-25, 改回日期 2007-03-08。张绮玲编辑。

two-scale fractal model of the distribution of element grade, and  $D$  represents the fractal dimension in the larger scale of the fractal model. The ore reserves of the Dayingezhuang deposit estimated by this modified model are up to  $5.26 \times 10^7$  ton, and the metal reserves are  $2.89 \times 10^5$  kg, showing a coherence between the estimated reserves and the geological conditions.

**Key words:** grade-tonnage model, altered rock, Jiaodong ore cluster area, fractal model

构造蚀变岩型金矿是一种重要的金矿类型,由于控矿构造深部延伸较好,矿床深部远景储量一般也较为乐观。地质经验对比、原生晕及物探法是预测隐伏矿体的有效手段,但由于矿体变化复杂,这些方法难以对深部资源量进行定量化的研究。因此,数学模型成为深部资源量定量预测的一个重要研究手段,其中品位-吨位模型是一个较为有效的数学模型(Turcotte, 1997),应用广泛(王祖伟等, 1999; 麻士华等, 2000; 魏民等, 2001; 肖克炎等, 2004)。胶东大尹格庄金矿是典型的构造蚀变岩型矿床之一,在利用品位-吨位模型分析该金矿远景储量时,发现模型存在一些缺陷,基于断裂带蚀变岩型金矿的具体特征,对品位-吨位模型进行了修正。本文利用修正后的品位-吨位模型对大尹格庄金矿的远景储量进行了预测,取得了较好的效果。

## 1 矿床地质特征

大尹格庄金矿床位于招平断裂带的中段,为一探明储量达超大型的构造蚀变岩型金矿床。围岩蚀变主要包括钾长石化、硅化、绢云母化、绿泥石化、(黄铁)绢英岩化、碳酸盐化等,其中黄铁绢英岩化是矿区最发育的一种中温热液蚀变,也是与金矿化关系最密切的蚀变作用,发育于招平断裂带主裂面之下的碎裂带中。大尹格庄矿区共探明规模不等的矿体近百个,主要分布于黄铁绢英岩化蚀变带中(图1)(凌洪飞等, 2002)。主要开采-500 m以上的工业矿石。矿床地球化学研究证实,成矿流体多期活动,具有幔源、岩浆热液与大气降水多来源性(邓军等, 2005)。

## 2 品位-吨位模型及其修正

品位-吨位模型构造原型如图2所示。考虑成矿流体在介质中的溶解-沉淀过程,元素在一部分岩石中不断富集,在另一部分岩石中不断贫化。随着成矿流体的不断活动,成矿元素最终在一部分岩石

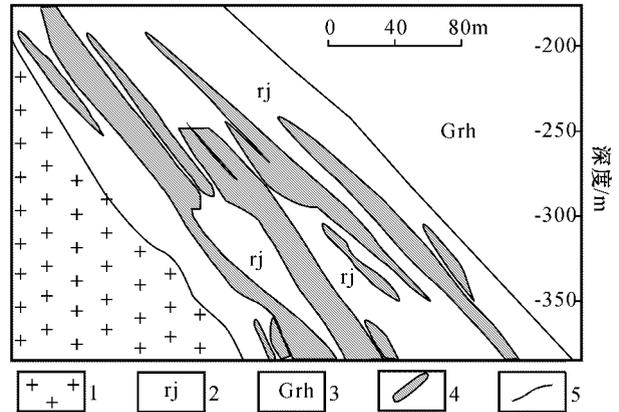


图1 大尹格庄金矿床II号矿体74.5线地质剖面图  
(源自大尹格庄金矿地测科)

1—玲珑花岗岩 2—黄铁绢英岩 3—胶东群 4—矿体;  
5—地质界线

Fig. 1 Geologic map of the 74.5 exploration line in the Dayingezhuang deposit (after Geological and Surveying Section, the Dayingezhuang Gold Mine)

1—Linglong granite; 2—Pyritic phyllic rock; 3—Jiaodong Group; 4—Ore body; 5—Geological boundary

中高度集中。品位-吨位模型的表达式为(Turcotte, 1997):

$$M = M_0 \left[ \frac{C}{C_0} \right]^{-3/D} \quad (1)$$

式中  $M$  为远景储量,  $M_0$  为研究区源岩中某元素总量,  $C_0$  为区域元素背景含量,  $C$  为元素工业品位,  $D$  为品位与吨位关系的分维值。由公式(1)可知,一般先估计源岩中的金属量,再计算矿床的远景储量。但是由于大尹格庄金矿成矿流体与成矿物质具有多来源性,从而源岩的空间范围不易圈定,所以(1)式的适用性不足,在进行复杂矿床储量预测时受到限制。

结合大尹格庄金矿构造蚀变岩的具体特征,可以对品位-吨位模型进行修正。其地质原型为成矿流体多期活动于构造破碎带中不断叠加而使金品位升高(图3)。假设共有  $n$  期成矿流体活动,按影响范围的大小自先到后排序,影响范围最大的一次流体蚀变事件记为第一次,此时蚀变岩总质量为  $M_0$ ,元

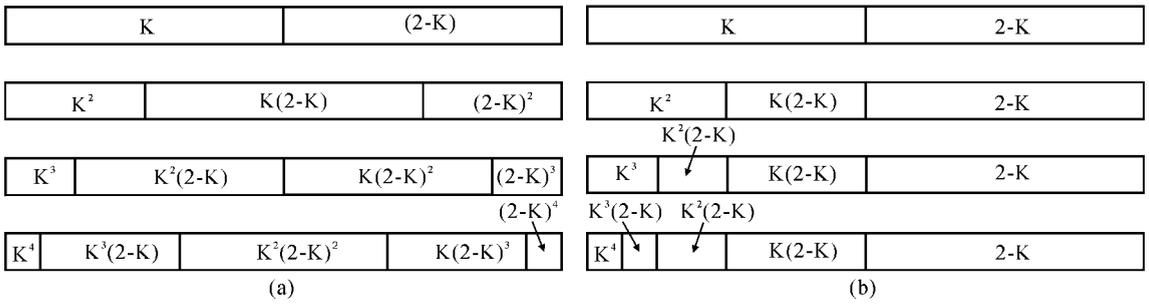


图 2 品位-吨位模型构造过程示意图 ( $2 > K > 1$ , 为富集系数) (据 Turcotte D L, 1997)

Fig. 2 Illustration of the constructional process of the ore grade and tonnage model ( $2 > K > 1$  means enrichment coefficient) (after Turcotte D L, 1997)

素背景初始含量为  $C_0$ 。成矿流体第二次活动影响的蚀变岩的范围为  $M_1$ , 元素含量为  $C_1$ , 分别表示为:

$$M_1 = M_0/a \quad (a > 1) \quad (2)$$

$$C_1 = \psi C_0 \quad (\psi > 1) \quad (3)$$

$\psi$  为浓集系数。上述过程在不变的标度下持续进行, 当第  $n$  次流体活动时, 有:

$$M_n = (b/a)^n M_0 \quad (4)$$

$$C_n = (b\psi)^n C_0 \quad (5)$$

其中  $0 < b < 1$ , 为衰竭系数, 代表下一次流体活动强度(包括活动范围及元素富集作用)的衰竭程度, 该文中设活动范围及元素富集作用的衰竭程度相同。由于岩石质量  $M$  同岩石线性尺度  $r$  间存在关系:  $M \propto r^3$ , 所以有下列关系存在:

$$\frac{C_n}{C_0} = \left[ \frac{M_0}{M_n} \right]^{\ln\psi/\ln a} = \left[ \frac{r_0}{r_n} \right]^{3\ln\psi/\ln a} \quad (6)$$

上式表明, 矿石量的分布符合幂函数关系, 其分维值  $D$  为:

$$D = 3 \ln\psi / \ln 2 \quad (7)$$

利用重整化群方法得到修正后的品位-吨位模型:

$$M = M_0 \left[ \frac{C}{C_0} \right]^{-3/D} \quad (8)$$

最后得到的公式与公式 1 相同, 但是其参数意义明显不同:  $M$  为矿石量,  $M_0$  为蚀变岩总质量,  $C_0$  为蚀变区元素背景含量,  $C$  为元素工业品位,  $D$  为品位数目-矿体几何尺寸分型模型中的幂指数。这样就不需要确定源岩的质量, 只需掌握蚀变岩质量, 由于蚀变岩的边界易于选定, 从而修正后的品位-吨位模型适用于构造蚀变性型等成矿物质多来源的矿床远景储量计算。

胶东蚀变岩型金矿  $Au$  元素品位分布的分形统计

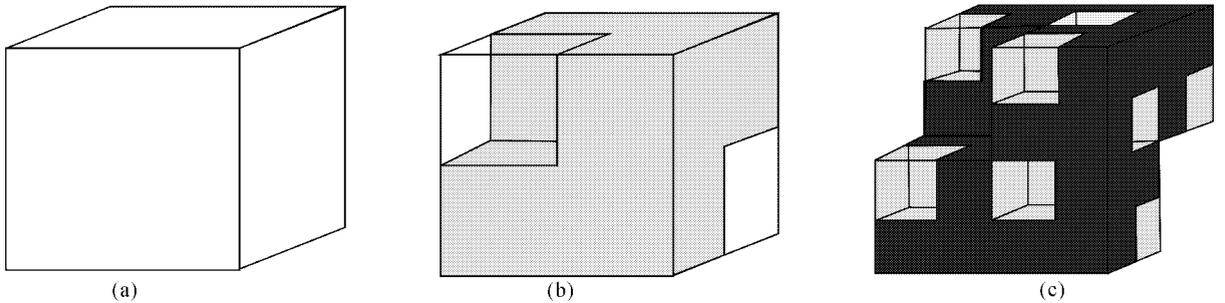


图 3 大尹格庄金矿多期流体叠加成矿示意模型

(a) 第一次成矿流体活动充填于构造破碎带中, 形成大范围蚀变带; (b) 第二次成矿流体叠加, 局部元素含量升高(灰度越大代表元素含量越高); (c) 第三次成矿流体叠加于前两次流体活动蚀变带之上

Fig. 3 Illustration of the metallogenic process with multi-stage superposition of fluids upon the Dayingezhuang deposit (a) Fluids of the first ore-forming fluid activity filled the structural shatter zone, forming large area of altered zone; (b) The superimposition of the second ore-forming fluids caused local enrichment of elements (increasing gray level means increasing element contents); (c) The third ore-forming fluids were superimposed upon the altered zone formed by the first and second fluid activities.

表明 Au 元素分布大多具有双标度分形的特征,低分维与高分维分界点可作为成矿元素品位背景值与异常值的临界点(Cheng et al., 1994; Cheng, 1999),因此,两个标度区间的分界点即为蚀变岩区的元素背景值。

### 3 远景资源量预测

先利用原品位-吨位模型计算大尹格庄金矿远景金属量。胶东矿集区成矿元素来源于胶东群、玲珑花岗岩和郭家岭花岗岩等, Au 元素在它们中的含量分别为  $(1.9 \sim 4.5) \times 10^{-9}$ 、 $(4.07 \sim 11.5) \times 10^{-9}$ 、 $(3 \sim 7.5) \times 10^{-9}$  [Au 的克拉克值为  $(3.5 \sim 4) \times 10^{-9}$ ]。由于 Au 在 3 种岩性中的差别较小,将 3 种源岩中的金含量近似视为相同,取值为  $5.5 \times 10^{-9}$ 。矿体中 Au 品位为  $5.5 \times 10^{-6}$ 。以系统的等间距刻槽取样金元素数据为基础,利用自相似统计分形模型(9)与(10)计算分维值 D。自相似统计分形模型:

$$N(r) = Cr^{-D} \quad r > 0 \quad (9)$$

r 表示特征尺度; C > 0 称为比例常数; D > 0 为盒子维数; N(r) 表示尺度大于 r 的数目。分维数的估计主要采用一元线性回归方法。将观测数据  $(r_1), N(r_1), (r_2), N(r_2), \dots, (r_n), N(r_n)$  和  $(\ln r_1, \ln N(r_1)), (\ln r_2, \ln N(r_2)), \dots, (\ln r_n, \ln N(r_n))$  代入线性回归方程:

$$\lg N(r) = -D \lg r + \lg C \quad (10)$$

用最小二乘法即可求出斜率 D。由于样品为等间距取样数据,所以统计的个数 N 可以代表矿体尺寸,从而所得的分维值 D 为品位-矿体几何尺寸的幂指数,计算金成矿元素的分维值为 1.76(图 4a)。由 1 式可得,  $2.7 \times 10^{10}$  t 的源岩才能形成 1 t 金属量。但是由于源岩范围不清,所以无法得出矿床的具体资源量。

再利用修正后的品位-吨位模型计算矿床的远景资源量。根据矿区地质平面图、各中段平面图及其比例尺,利用相交直线对成矿模拟区进行均匀网格化,取深度为 1 000 m,矿体倾角 36°,最后估算得知矿区黄铁绢英岩总体积约占  $4.46 \times 10^8$  m<sup>3</sup>。取黄铁绢英岩的密度为 2.94 g/cm<sup>3</sup>,最后估算得矿区黄铁绢英岩的总质量为  $1.312 \times 10^{12}$  kg。对大尹格庄金矿成矿流体 Au 元素进一步进行更为精细分形统计,得到其背景值与异常值以品位 1.0 g/t 为界的双标度分形模型,两标度区直线拟合较好(图 4b)。在品位 0.05~1.0 g/t 的范围内,分维为 0.40,拟合优度 0.9498;在品位 1.0~30 g/t 范围内,分维为 1.60,拟合优度 0.9858。因此,成矿区带的元素背景含量,取大于品位背景值区间的分维值,即 D = 1.60。计算得 -1 000 m 以上蚀变岩中总矿石量  $5.26 \times 10^7$  t,金属量为  $2.89 \times 10^5$  kg。现在大尹格庄金矿探明储量已达到超大型矿床规模,表明预测的远景资源量相对合理。

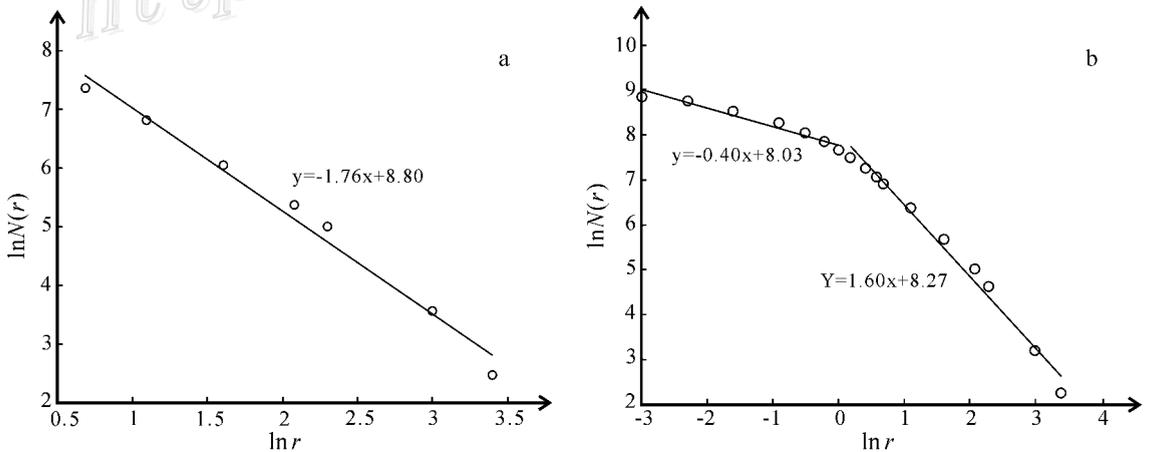


图 4 大尹格庄金矿成矿元素品位分布分形模型

a. 单标度简单分形; b. 双标度简单分形。r 为品位尺度, N 为样品个数

Fig. 4 Statistic fractal of the grade distribution in the Dayin gezhuang deposit

a. Single scale simple fractal; b. Two-scale simple fractal; r—Grade scale; N—Number of samples

## 4 讨论与结论

本文基于断裂带蚀变岩型金矿的具体特征,修正了品位-吨位模型,结合多标度统计分形模型,预测了大尹格庄金矿床的远景储量。在原模型中,远景储量  $M$  为研究区源岩中某元素总量  $M_0$  的函数,另包括3个参数,分别为: $C_0$  为区域元素背景含量, $C$  为元素工业品位, $D$  为品位与吨位关系的分维值;在修正后的模型中, $M_0$  为蚀变岩总质量, $C_0$  为蚀变区元素背景含量(由多重分形决定), $C$  为元素工业品位, $D$  为矿体品位分布分维值。根据修正后品位-吨位模型,计算得1000 m以浅蚀变岩总矿石量  $5.26 \times 10^7$  t,金属量为  $2.89 \times 10^5$  kg;说明大尹格庄金矿深部还存在较大的成矿潜力。

由于模型在某些环节上仍考虑地较为简单,如将多期成矿流体活动范围及矿化强度的衰竭视为近似相同,得到的远景资源量较为理想。尽管如此,模型内蕴分形性,把握了构造蚀变岩型金矿元素品位分布与矿体储量分布的重要属性,是矿床资源量预测的有效参考。

致谢 感谢胶东大尹格庄金矿提供基础数据。

### References

- Cheng Q M, Agterberg F P and Ballantyne S B. 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal method[J]. *J. Geochem. Explor.*, 5(2):109~130.
- Cheng Q M. 1999. Spatial and scaling modeling for geochemical anomaly separation[J]. *Geochem. Explor.*, 65:175~194.
- Deng J, Wang Q F and Yang L Q. 2005. An analysis of the interior

structure of the gold hydrothermal metallogenic system of the north-western Jiaodong Peninsula, Shandong Province[J]. *Earth Science*, 30(1):102~108 in Chinese with English abstract).

- Ling H F, Hu S X and Sun J G. 2002. Geochemical study of granitic wall-rock alteration in Dayingezhuang gold deposit of alteration rock type and Jinqingding gold deposit of quartz-vein type[J]. *Mineral Deposits*, 21(2):187~199 in Chinese with English abstract).
- Ma S H, Zhu X S and Li C H. 2000. Spatial distribution of the Fluorite deposit in Zhejiang province[J]. *Mineral Deposits*, 19(3):281~288 in Chinese with English abstract).
- Turcotte D L. 1997. *Fractals and chaos in geology and geophysics*[M]. Cambridge University Press. 398p.
- Wang Z W, Zhou Y Z and Li C H. 1999. Fractal characteristics of Silver-gold deposits in the PangXiDong-JinShan metallogenic belt, South China[J]. *Mineral Deposits*, 18(2):183~188 in Chinese with English abstract).
- Wei M, Zhao P D and Liu H G. 2001. Grade-tonnage model of original gold deposits in China[J]. *Earth Science*, 26(2):43~50 in Chinese with English abstract).
- Xiao K Y, Li J C and Chen Z H. 2004. The model of China's copper grade-tonnage and the resource appraisal technique[J]. *Geological Review*, 50(1):50~56 in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 邓军,王庆飞,杨立强等. 2005. 胶东西北部金热液成矿系统内部结构解析[J]. *地球科学*, 30(1):102~108.
- 凌洪飞,胡受奚,孙景贵等. 2002. 胶东金青顶和大尹格庄金矿床花岗岩围岩的蚀变地球化学研究[J]. *矿床地质*, 21(2):187~199.
- 麻士华,朱兴盛,李长江. 2000. 浙江萤石矿床的空间分布[J]. *矿床地质*, 19(3):281~288.
- 王祖伟,周永章,姚东良等. 1999. 两广庞西垌-金山成矿带银金矿床分形性研究[J]. *矿床地质*, 18(2):183~188.
- 魏民,赵鹏大,刘红光等. 2001. 中国岩金矿床品位-吨位模型研究[J]. *地球科学*, 26(2):43~50.
- 肖克炎,李景朝,陈郑辉等. 2004. 中国铜矿床品位吨位模型[J]. *地质论评*, 50(1):50~56.