

山东大尹格庄金矿蚀变岩中矿体分布稳定性的动力学控制参量探讨*

王庆飞^{1,2} 邓军^{1,2} 万丽³ 杨立强^{1,2} 龚庆杰^{1,2}

WANG QingFei^{1,2}, DENG Jun^{1,2}, WAN Li³, YANG LiQiang^{1,2} and GONG QingJie^{1,2}

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, 广州 510006

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 510006, China

2006-08-07 收稿, 2006-10-30 改回.

Wang QF, Deng J, Wan Li, Yang LQ and Gong QJ. 2007. Discussion on the kinetic controlling parameter of the stability of orebody distribution in altered rocks in the Dayingezhuang gold deposit, Shandong. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 861–864

Abstract Persistence exponent (Hurst exponent) of element grade distribution is the important controlling parameter for the stability of orebody distribution, and R/S analysis is a valid calculating method for Hurst exponent. The calculations of Hurst exponent of the series of Au grades in different exploration lines in the Dayingezhuang gold deposit via R/S analysis show the Hurst exponents range between 0.64 and 0.83, their mean value and variance are 0.75 and 0.09 respectively, which are both bigger than those of the empirical Hurst exponents of random walk. The results show the element distribution belongs to biased random walk and is positive persistence; yet the distribution fluctuates much in space affected by many geological factors. The positive persistence of element distribution in the beresitization altered rock suggests the development of orebodies is relatively stable and they appear continually or repeatedly in this specific geologic background, which corresponds to the geological facts in the Dayingezhuang gold deposit.

Key words R/S analysis, Hurst exponent, Dayin'gezhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula, Altered rock type

摘要 元素品位分布的相依性指标——赫斯特指数(Hurst 指数)是矿体分布稳定性的动力学控制参量,重标极差(R/S)分析是相依性分析的有效方法。利用 R/S 分析对胶东大尹格庄金矿黄铁绢英岩内不同勘探线金元素品位系列的 Hurst 指数计算发现, Hurst 指数主要介于 0.59 至 0.89 之间,均值为 0.75,标准差为 0.09,均大于随机行走经验 Hurst 指数的均值与标准差;计算结果说明元素品位分布存在正相关性,但由于受多种因素影响,其空间分布的相依性具有一定波动。元素品位分布的正相依性显示在特定的地质背景内,矿体连续分布或者间断出现,发育相对稳定,其与大尹格庄金矿的地质事实相吻合。

关键词 R/S 分析; Hurst 指数; 大尹格庄金矿; 胶东; 蚀变岩型

中图法分类号 P618.51

蚀变岩型金矿床中的矿体分布于宽大蚀变带中,形态发育不规则,其分布稳定性的控制机制虽一直为矿床学家所关注,但缺乏有效的探索方法。同位素地球化学与流体包裹体分析等研究提供了大量成矿年龄、物质来源、成矿流体物理

化学性质等重要信息,但它们与矿体分布稳定性的直接对应关系并不明显,而成矿元素品位的空间分布是制约矿体发育的直接因素,成为研究的切入点。成矿元素在空间中的分布具自仿射性,等间距的元素品位可视为位置的随机序列,可

* 国家自然科学基金项目(No. 40572063, 40672064)、教育部“跨世纪人才培养计划”、中国博士后科学基金(2005038361)和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)。

第一作者简介: 王庆飞, 男, 1978 年生, 博士后, 矿床学, E-mail: wqingfei@vip.sina.com

以用随机行走或有偏随机行走动力学模型刻画,同时品位空间变化的相依性表征参量——赫斯特指数(Hurst 指数)是描述该物理模型的重要指标,从而 Hurst 指数也就成为制约矿体分布稳定性的关键动力学控制参量。重标极差(R/S)分析是相依性解析的稳健性较好的方法,它自创立以来被广泛应用于物理学、化学、生物学、经济学、地震学等科学领域(Hurst, 1965; Turcotte, 1997),但在矿床学研究中应用尚较为罕见;另外,R/S 分析的应用过程中缺乏必要的有效性检验,随机序列分布相依性的判断不甚严谨(Mandelbrot, 1982)。本文利用 R/S 分析及其有效性检验方法,对胶东典型蚀变岩型金矿——大尹格庄金矿的蚀变带中不同部位成矿 Au 元素品位空间分布的 Hurst 指数进行了解析,以探讨 Au 品位分布相依性特征及矿体分布稳定性的动力学背景。

1 矿床地质特征

大尹格庄金矿床是胶东地区蚀变岩型金矿床的典型代表之一,位于招(远)-平(度)断裂带的中段,招-平断裂是区内的控矿构造(陈衍景等, 2004; 邓军等, 2005; 沈昆等, 2000)。主裂面由断层泥和糜棱岩组成,主裂面之上为碳酸盐化碎裂岩,主裂面之下为黄铁绢英岩和黄铁绢英岩化花岗岩。1号矿化蚀变带是主要的黄铁绢英岩化蚀变带,长约3000m,宽30~78m,最宽处140m,总体走向NE20°,倾向南东,倾角20~50°。主裂面之上仅有微弱的金矿化,金的工业矿体均赋存在主裂面之下,随着蚀变强度的降低,金矿化也减弱。大尹格庄矿区共探明规模不等的矿体近百个,主要分布于1号蚀变带中。II号矿体为矿床内的主要矿体,产出于招平断裂带主裂面之下的黄铁绢英岩化碎裂岩中,主要分布于66~84勘探线的-26m至-600m之间;矿体呈不规则的

大脉状产出,矿体走向17°~26°,倾向南东,倾角约为40°,沿走向及倾向呈舒缓波状延伸,膨胀夹缩、分枝复合现象明显(图1);II号矿体矿化形式主要为浸染状,次为细脉状;黄铁矿呈浸染状、斑点状及网状脉;矿体Au品位集中于 $2 \sim 7 \times 10^{-6}$ 之间,品位变化系数为86%,属有用组份分布较均匀矿体。现主要开采有-140m、-175m、-210m和-290m等4个中段。

2 Hurst 指数与 R/S 分析

Hurst 指数是一维有序数据集自仿射性的重要参量,也是一个十分强健和有效的统计量;尽管它仅是一个简单数值,但是可反映出有序数据集的重要性质,即:(1)可区分数据集是完全随机序列($H=0.5$)还是非完全随机序列($H \neq 0.5$);(2)进一步判定是否为正相依性序列($0.5 < H < 1$)还是负相依性序列($0 < H < 0.5$)。

R/S 分析或称重标极差分析法(Rescaled Range Analysis),是一种得到广泛运用的非参数统计方法。其基本思想是改变研究尺度的大小,研究不同尺度间的统计特性的不变性。其中R称为极差,是最大累积离差与最小累积离差之差,代表数据集的复杂程度;S称为标准差,即变差的平方根,代表数据集的平均趋势。二者之比重标极差R/S就代表数据集相对波动强度。计算原理如下:

设已知有序数据集 $\{\xi_i\}_{i=1}^N$,对于任意整数 τ ,则 τ 个数据的平均值:

$$(E\xi)_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \xi_i \quad (1)$$

由此求出累积离差:

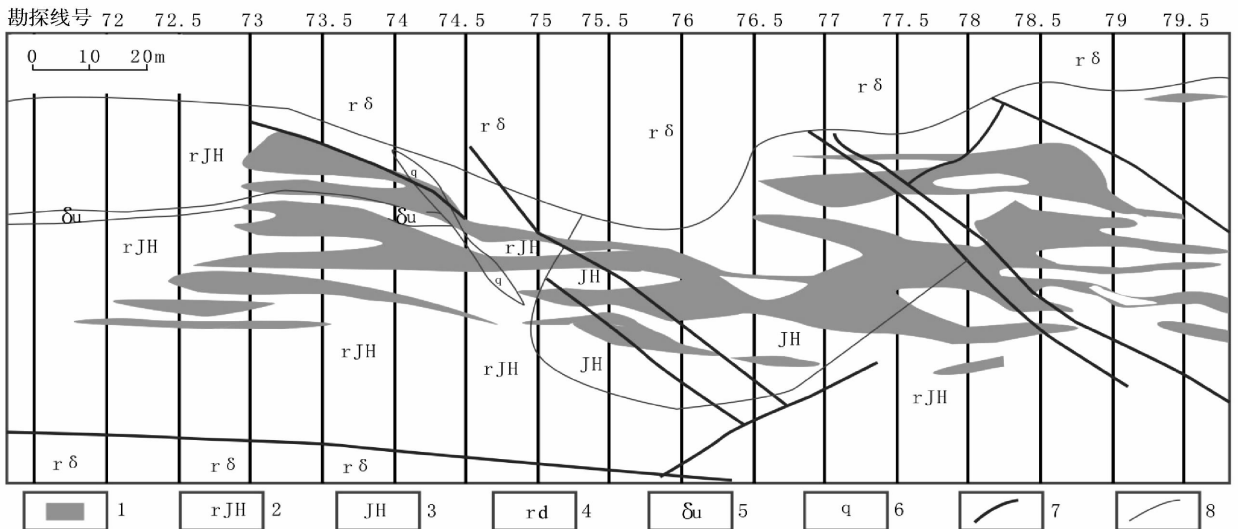


图1 大尹格庄金矿-175m中段II号矿体分布图(据大尹格庄金矿地测科资料改编)

1-矿体; 2-黄铁绢英岩化花岗岩; 3-黄铁绢英岩; 4-花岗岩闪长岩; 5-闪长玢岩; 6-石英脉; 7-断层; 8-地层界线

Fig. 1 The orebody distribution at -175m level in the Dayingezhuang ore deposit

$$X(i, \tau) = \sum_{i=1}^i [\xi_i - (E\xi)_\tau] = \sum_{i=1}^i \xi_i - i(E\xi)_\tau, 1 \leq i \leq \tau \quad (2)$$

其中 $1 \leq i \leq \tau$, 其极差为:

$$R(\tau) = \max X(i, \tau) - \min X(i, \tau) \quad (3)$$

其标准差:

$$S(\tau) = \left\{ \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} [\xi_i - (E\xi)_\tau]^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

Hurst 指数的经验关系式为:

$$R(\tau)/S(\tau) \propto \tau^H \quad (5)$$

在双对数坐标系 $\ln[R(\tau)/S(\tau)] \sim \ln \tau$ 中用最小二乘法拟合即可得到 Hurst 指数。

具体计算步骤如下: ① 把总数目为 N 的数据集分为 M 个长为 n ($n \geq 3$) 的子区间; ② 按公式 1~5 式计算每个子区间的 R/S 值; ③ 计算 M 个 R/S 值的算术平均值, 记为 $E(R/S)_n$; ④ 将子区间长度增加, 保持 N/n 是一个整数, 这样包括了数据集起止点的所有值。重复步骤 ①~③, 直到 $n = N/2$; ⑤ 根据关系式: $E(R/S)_n = Cn^H$, 对其两边取对数得:

$$\ln E(R/S)_n = \ln C + H \ln n \quad (6)$$

采用最小二乘法进行估计, 所得的直线斜率即为所求的 Hurst 指数。

为评价 R/S 分析的可靠性, 应对 Hurst 指数进行有效性检验, 将实际计算而得的 Hurst 指数与随机游走经验 Hurst 指数 $E(H)$ 比较, 本文采用 Peters E. E. (1994) 提出的计算 $E(R/S)_n$ 经验值公式:

$$E(R/S)_n = \frac{n-0.5}{n} \cdot \left(\frac{n\pi}{2} \right)^{-0.5} \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{\frac{n-i}{i}} \quad (7)$$

计算方法同计算实际 Hurst 指数估计值相同, 式(7)的计算结果与蒙特卡罗模拟结果吻合程度很高, 在模拟计算过程中会发现 $E(R/S)_n$ 是遵循正态分布的随机变量, 从而需利用经验 Hurst 指数 $E(H)$ 与计算 Hurst 指数的均值与方差进行比较, 判断元素品位序列分布的相依性。

3 品位分布相依性分析

以大尹格庄金矿Ⅱ号矿体中沿勘探线的等间距刻槽取样数据为对象, 设定数据起点, 使采样点与起点的间距为 $r = 1, 2, \dots, N$, 则勘探线上 Au 元素品位系列 $Z(r)$ 是采样间距 r 的一维随机序列。根据 Hurst 指数估计方法, n 取值范围为 $5 < n \leq N/2$, 计算出重标极差序列 $E(R/S)_n$ 。如果 $E(R/S)_n$ 与 n 在双对数散点图中呈现明显的线性关系, 就表明元素品位序列 $Z(r)$ 具有自仿射性分形特征, 直线的斜率就是 Hurst 指数。

大尹格庄金矿 -175m 中段、-282m 中段、-290m 中段不同勘探线 Au 元素分布 R/S 分析所得参数结果见表 1。 $\ln E(R/S)_n$ 与 $\ln n$ 具有很好的线性相关性 (图 2), 直线拟合优度均在 0.92 以上。Hurst 指数均大于 0.5, 在 0.59 至

表 1 大尹格庄金矿多个中段不同勘探线 Au 元素品位分布 R/S 分析 Hurst 参数计算结果

Table 1 Hurst exponent estimated by R/S analysis in the different exploration lines at various levels in Dayingezhuang ore deposit

中段	勘探线	Hurst 指数	拟合优度	$E(H)$
-175m	73	0.66	0.9946	0.68
	74	0.84	0.9917	0.72
	75.5	0.83	0.9919	0.72
	76	0.68	0.9572	0.69
	77	0.84	0.9954	0.68
	77.5	0.80	0.9952	0.72
-210m	78	0.63	0.9745	0.68
	78.5	0.62	0.9369	0.72
	70	0.60	0.9209	0.70
-282m	73	0.74	0.9950	0.68
	79.5	0.74	0.9906	0.74
-290m	72~73.5	0.84	0.9946	0.67
	75	0.83	0.9960	0.68
	76	0.79	0.9983	0.67
	72	0.69	0.9801	0.72
	72.5	0.83	0.9818	0.68
	74	0.82	0.9950	0.70
	75	0.89	0.9498	0.66
	76	0.72	0.9903	0.63
	78.5	0.59	0.9526	0.69
	80	0.65	0.9883	0.67

0.89 之间。进一步对计算结果进行有效性检验, 在计算中采用与计算实际重标极差相同的 n 算出对应的经验重标极差期望值, 进而求出随机行走经验 Hurst 指数 (图 3)。由于计算 $E(R/S)_n$ 经验公式(7)只与 n 的选择有关, 所以计算出的 $E(H)$ 各勘探线会有所不同。

大尹格庄金矿矿化区 Hurst 指数的均值为 0.75, 而 $E(H)$ 的均值为 0.69, 说明矿化区元素分布具有长程相关性, 但这种持续状态是有限的, 即存在统计循环长度; 矿化区 Hurst 指数的标准差为 0.094, $E(H)$ 的标准差为 0.026, 显示成矿元素分布受多方因素影响, 相依性特征有一定波动。

4 结论

利用 R/S 分析对山东大尹格庄金矿蚀变带内的不同中段多个勘探线的成矿元素品位分布相依性进行了解析, 证实 R/S 分析稳健性较好, 对中小型数据集可以取得较理想的统

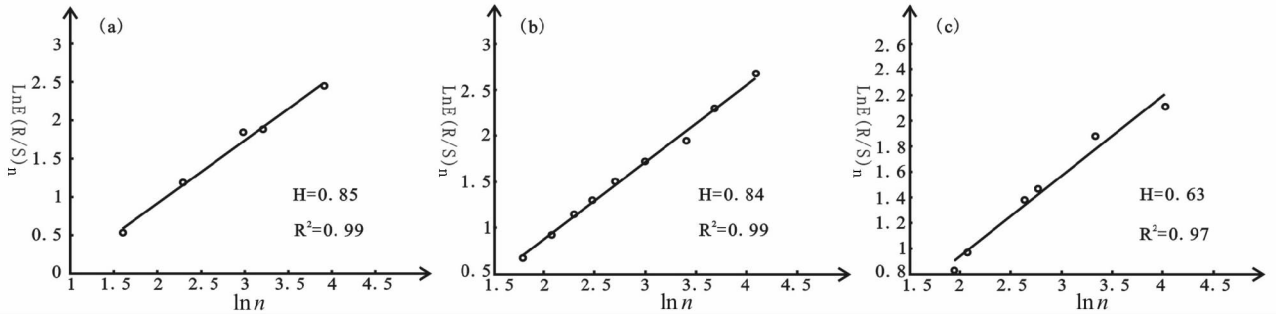


图2 大尹格庄金矿-175m中段75.5、77和78勘探线Au元素品位分布R/S分析法计算Hurst指数图解

(a)75.5勘探线; (b)77勘探线; (c)78勘探线

Fig.2 Calculation diagram of the Hurst exponent by R/S analysis method of the grade distribution of the 75.5、77 and 78 exploration lines at -175m level in the Dayingezhuang ore deposit

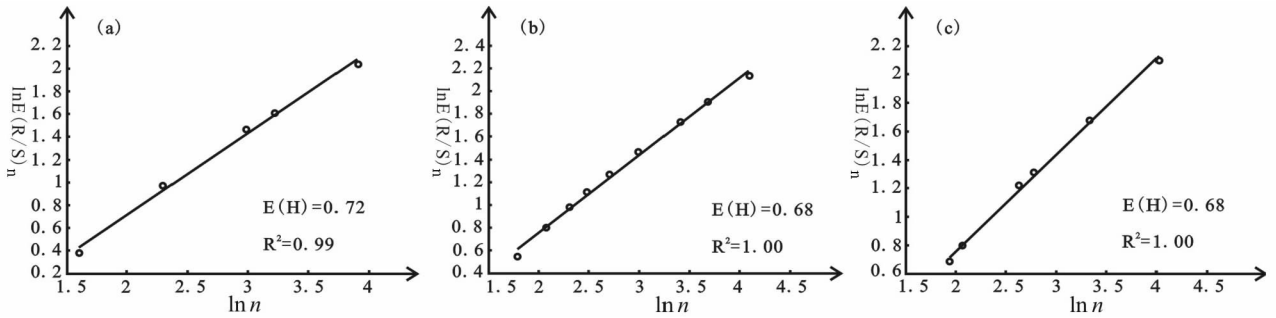


图3 大尹格庄金矿-175m中段75.5、77和78勘探线Au元素品位分布随机行走经验Hurst指数计算图解

(a)75.5勘探线; (b)77勘探线; (c)78勘探线.

Fig.3 Calculation diagram of the experienced Hurst exponent of random walk for the 75.5、77 and 78 exploration lines at -175m level in the Dayingezhuang ore deposit

计结果,是探讨矿体稳定性的有效方法。不同勘探线金元素品位分布的Hurst指数均大于0.5,经有效性检验,Au品位分布的Hurst指数的均值与标准差大于随机行走经验Hurst指数的均值与标准差,说明元素品位分布符合有偏随机行走模型,并存在正相依性,但由于受多方因素影响,其空间分布相依性特征具有一定波动。黄铁绢英岩蚀变岩内的元素品位沿勘探线的分布具有正相依性,说明前一地段的品位增长可能意味着下一地段的的增长,高品位的出现具有持久记忆性和周期性,指示在特定的地质背景内矿体连续分布或者间断出现,发育比较稳定,其与大尹格庄金矿的地质事实相吻合。但该结果对黄铁绢英岩蚀变带外围的矿体分布不具有指示意义,这是因为随着地质背景的变化,品位数据也会发生改变,则元素分布的相依性结果也会随之发生调整。

References

- Chen YJ, Pirajno F, Lai Y and Li C. 2004. Metallogenic time and tectonic setting of the Jiaodong gold province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(4):907-922 (in Chinese with English abstract)
- Deng J, Wang QF, Yang LQ *et al.* 2005. An analysis of the interior

- structure of the gold hydrothermal metallogenic system of the northwestern Jiaodong peninsula, Shandong province. *Earth Science - Journal of China University of Geosciences*, 30(1):102-108 (in Chinese with English abstract)
- Hurst HE, Black RP, Simaika YM. 1965. *Long-Term Storage: An Experimental Study*, London: Constable; 1-155
- Mandelbrot BB. 1982. *The fractal geometry of nature*. San Francisco: Freeman. 468
- Peters EE. 1994. *Fractal Market Analysis*. John Wiley & Sons, Lnc, 315
- Shen K, Hu SX, Sun JG *et al.* 2000. Characteristics of ore-forming fluids of the Dayingezhuang gold deposit in Eastern Shandong, China. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4):907-922 (in Chinese with English abstract)
- Turcotte DL. 1997. *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press

附中文参考文献

- 陈衍景, Franco PIRAJNO, 赖勇, 李超. 2004. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境. *岩石学报*, 20(4):907-922
- 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. *地球科学*, 30(1):102-108
- 沈昆, 胡受奚, 孙景贵等. 2000. 山东招远大尹格庄金矿成矿流体特征. *岩石学报*, 16(4):542-550