

归来庄金矿床 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 异常的地质统计学研究

肖 斌¹ 赵鹏大² 周龙茂³

(1. 北京大学地质学系, 北京 100871; 2. 中国地质大学资源学院, 武汉 430074; 3. 华东地质学院地质系, 抚州 344000)

摘要: $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 比值在金矿床评价方面是一个重要的标志, 也可以提供金矿成因的重要信息. 对归来庄金矿床的 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 异常进行地质统计学研究, 利用指示克立格法研究 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 的分布规律, 查明 Au 的赋存部位, 并对该区今后工作提出建议.

关键词: $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 异常; 金矿床评价; 地质统计学; 指示克立格法.

中图分类号: P562

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)01-0079-04

作者简介: 肖斌, 男, 1969年生, 1999年毕业于中国地质大学(北京), 获博士学位, 现在北京大学进行博士后研究, 主要从事三维 GIS 研制与开发和地质统计学的理论与应用研究工作.

归来庄金矿床产出与华北地台东部, 是与富钾碱性次火山岩浆活动紧密相关的富含贵金属的石英-萤石-冰长石型中低温热液金矿床^[1]. 据山东省地矿局资料研究, 在铜石杂岩体范围内, Au 矿化增强时, Ag, As, Sb, Mo, Bi, Hg 等的含量都相应增高, 表明这些元素对金成矿具有指示意义^[2~4]. Ag 是矿石的主要伴生成分, Ag 的矿化与 Au 的矿化段基本对应, 与 Au 的富集部位相比, Ag 矿化富集部位略深^[5]. 据统计, 金矿体中 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 比值(Au, Ag 的品位比)由浅部至深部略呈增高的趋势, 0 m 标高以上, $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 比值接近 1, 0 m 标高以下, 其值大于 2.

$w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 比值在金矿床评价方面是一个重要的标志, 它也可以提供金矿成因的重要信息^[6]. 对归来庄金矿床的 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 进行地质统计学研究, 查明 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 对该区金成矿及其分布的影响, 对该区今后的找矿工作具有重要的指导意义^[7].

1 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 指标特征

据山东省地矿局资料分析, 归来庄金矿床中 Au-Ag 的相关性较高. 在 Au 特低品位($<1 \times 10^{-6}$)

时, $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 之值通常小于 1. Au 品位增高, Ag 也相应增高, 但 Au 的增幅较大, $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 常大于 1. 在成矿过程中成矿溶液是从 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 低比值向高比值方向演化. Ag 在成矿较早阶段先于 Au 沉淀, 剩余溶液中 Au 的含量提高, 晚阶段生成的金矿物的成色也提高了, 自然金可能是晚阶段沉淀的. 根据 Ag 和 Au 的空间变化特征分析, 矿体浅部的 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 比值高, 向深部减小, 深部 Ag 含量高于 Au, Au 有向浅部富集的趋势. 金在较晚阶段相对富集, Au, Ag 有分异, Au 富集于较低温的热液中.

对归来庄金矿床的 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 异常进行地质统计学研究是在一定的研究区内进行的, 研究区选在归来庄金矿床及其周边共 1 000 多 km^2 的范围内. 对研究区内所有含有 Au, Ag 的点进行取样, 共有样点 241 个, 根据这 241 个样品作 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 比值统计分布直方图(图 1).

直方图显示为单峰曲线, 大部分样品的 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 比值较低, $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 高比值的样品突然减少, 整个直方图呈现出一个长尾巴. 实验偏度与理论偏度之比: $5.75/0.62 = 9.27$; 实验峰度与理论峰度之比: $38.71/0.31 = 124.87$.

统计结果表明原始数据严重偏离正态分布, 若用传统的参数地质统计学来研究该区的 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$, 则应对原始数据进行处理使其服从正态分布, 以满足参数地质统计学方法对数据分布的要求.



图 1 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 原始数据直方图

Fig.1 Original data histogram of $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$



图 2 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 经特异处理后的直方图

Fig.2 Histogram of $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ after disposing outliers

经特异值处理后服从较好的正态分布(图 2),然而参数地质统计学需要对数据分布的平稳性作出假定,但是这种平稳或准平稳假设很难进行检验,这就限制了参数地质统计学方法的应用^[8].

2 应用指示克立格法研究 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 异常

由于非参数地质统计学无须要求母体服从某种分布类型,也不需满足平稳或准平稳假设,因而可操作性强.为了利用归来庄金矿中与金成矿相关的 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 信息来研究金异常,在非参数地质统计学理论指导下,利用指示克立格法对归来庄金矿 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 分布进行估计^[9-11].

2.1 临界值的选择与指示转换

临界值的选择对指示克立格法来说相当关键,它将影响到序次相关问题的出现及结构分析的正确性,最终影响指示克立格法的估计精度^[12].

据前面统计分析结果,数据变化范围在(0.036, 10.925)内,均值为 1.14, 94.61%的数据集中在(0.0, 2.2)以内.经特异值处理后,数据主要落在(0.036, 2.220)内,均值为 0.990.在选择临界值时,考虑到

数据分布的特点,选择了 13 个临界值,且临界值主要分布在数据集中区.这 13 个临界值依次为:0.10, 0.44, 0.64, 0.84, 1.03, 1.24, 1.44, 1.64, 1.84, 2.04, 2.24, 3.00, 4.00.各待估点信息样指示值的获得就是以这 13 个临界值作为阈值,对不同的滑动邻域内的信息样进行指示转换.

区域化变量 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 连续分布,故指示转换的表达式为:

$$I[x_a; z^l] = \begin{cases} 1, & \text{若 } x_a \text{ 点处 } Z(x_a) \leq z^l, \\ 0, & \text{若 } x_a \text{ 点处 } Z(x_a) > z^l. \end{cases}$$

这里 $Z(x_a)$ 是信息样, $a = 1, \cdots, 241$; z^l 是临界值, $l = 1, \cdots, 13$.

2.2 空间结构分析

地质统计学就是要研究那些在空间分布上既具随机性又有结构性的自然现象,因而对区域化变量 ($w(\text{Au})/w(\text{Ag})$)进行准确的结构分析对地质统计学研究来说相当重要.区域化变量空间分布特征分析主要是通过计算其在不同方向的变异函数,并对反映空间结构的变异函数实验曲线进行拟合来实现.

由于原始数据来自于小比例尺(1:200 000),数据较少,使结构分析的精确性受到影响,但已有的 241 个信息点均匀分布,能基本反映 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 在该区的空间分布特征,原则上已满足结构分析对信息样品的要求,可以进行结构分析.

$w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 的指示克立格法研究是以其指示转换值为基础,计算 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 指示转换值在不同方向的变异函数,绘制 5 个方向 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 经指示转换后的变异函数实验曲线(图 3).从多方向变异函数实验曲线可以看出,5 个方向的变异函数实验曲线基本一致, $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 在不同方向上可以认为保持各向同性.

对 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 的套合结构进行分析其实就是一个结合金矿成矿过程对 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 空间变



图 3 所有 5 个方向 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 变异实验曲线

Fig.3 Semivariogram experimental curves in five directions



图 4 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 变异函数拟合曲线
Fig. 4 Semivariogram fitting curves of $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$

异实验曲线的拟合过程,如果成矿是多期多阶段的,那么就应用多个套合结构来反映.由于归来庄金矿床在成因上主要与次火山杂岩有关,笔者只考虑了次火山杂岩这一主要成矿地质作用,因而只用一个套合结构来对归来庄金矿床 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 的空间结构进行拟合.

以 135° 方向的变异函数实验曲线为代表对该区 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 进行空间结构分析,结果表明, $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 变异函数实验曲线可以用一个块金效应为 0.12 个单位、基台值为 0.272 个单位、变程是 6 500 m 的球状模型来拟合,拟合结果见图 4. 块金效应的大小反映了 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 结构间的随机变化程度;基台值是块金效应的 2 倍以上,说明 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 在变程范围内具有较强的相关性,可以用克立格法来进行估计;变程 6 500 m 主要与该区铜石次火山杂岩体出露范围有关.

根据套合结构分析,归来庄金矿床 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 的空间变异模型简化为:

$$\begin{aligned}\gamma(h) &= C_0 + C \times (1.5 \times h/a - 0.5 \times h^3/a^3) = \\ &0.12 + 0.076 \times (h/2\,166.7 - h^3/6\,500^3); \\ &0 < h \leq a, 0 < h \leq 6\,500\text{ m}.\end{aligned}$$

其中: $\gamma(h)$ 是区域化变量的变异函数值; h 是点间距离; a 是区域化变量的变程.

2.3 指示克立格法方案设计

根据 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 的空间结构变异特征,考虑到该金矿床具体地质情况、原始数据间距较大等方面因素,制定适合本区的指示克立格法方案.按照超级块段法的原则,将研究区划分成 2×2 四大块,又将其细分为 90×80 个待估区,待估区大小为 $400\text{ m} \times 325\text{ m}$,搜索直径为 6 500 m,各向异性比为 1.

2.4 交叉验证

临界值的选择是否恰当与区域化变量的空间变异结构分析正确与否是指示克立格法估计精确性的关键. $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 经指示转换后得到的空间变



图 5 指示克立格法交叉验证直方图
Fig. 5 Cross validating histogram of indicator Kriging method

异结构模型参数准确性需要进行交叉验证后才知道.

以 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 的空间结构模型参数为基础,对该区已有的 241 个样点进行指示克立格法检验,作差值统计直方图(图 5),据该图分析:差值变化范围在 $(-1.258, 2.176)$ 内,均值为 $-0.011\,5$;差值在 $(-0.57, 0.46)$ 内的占总数的 82.99%,差值的绝对值大于 1 的仅占 3.32%;由于差值集中在小值区,方差很小,仅 0.24,因而用该空间变异结构模型来对归来庄金矿床 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 进行指示克立格法估计,其结果是可信的.

2.5 指示克立格法估计

归来庄金矿床 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 指示克立格法估计分布等值线如图 6 所示.根据该区 Au 的分布,结合图 6 可以得出: $w(\text{Au})/w(\text{Ag}) > 1.5$ 的区域基本上就是 Au 的异常区,归来庄金矿床就在此区内; $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 高值区与 Au 高值区一致;图 6 表明归来庄金矿床的西北部和南部地区有高 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 区,说明该矿床的西北部和南部地区有找矿前景,因而今后在归来庄金矿区周边开展找矿工作



图 6 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 指示克立格法估计分布等值线
Fig. 6 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ isoline of indicator Kriging estimation

时,应重点考虑其西北部和南部与次火山杂岩体接触部位.

3 结论

归来庄金矿床 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 的地质统计学研究表明, $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 对归来庄金矿的找金工作具有指导意义, 可以作为找矿标志. 应加强金矿成矿指示元素的研究, 如 Ag, As, Sb, Mo, Bi, Hg 等, 加强新技术、新理论、新方法在该区的应用, 提高对现有资料的利用率, 增强多元信息的综合提取能力. 今后除继续加强归来庄金矿区与铜石次火山杂岩体接触带的找矿工作外, 可以适当将找矿空间放大, 向矿区的西北部、南部和东南部展开.

参考文献:

[1] 于学峰. 归来庄金矿床的地质特征及成因[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1996. 129~139.
[2] 陈永清. 鲁西综合信息金成矿系列预测理论和方法研究[D]. 长春: 长春地质学院, 1994.
[3] 林景仟, 谭东娟, 于学峰, 等. 鲁西归来庄金矿成因[M]. 山东: 山东科学技术出版社, 1996. 40~103.

[4] 林景仟, 谭东娟, 于学峰, 等. 归来庄金矿成因及成矿模式[J]. 长春地质学院学报, 1995, 25(3): 286~293.
[5] Chen Y Q, Zhao P D. Zonation in primary halos and geochemical prospecting pattern for the Guilaizhuang gold deposit, eastern China [J]. Nonrenewable Resources, 1998, 7(1): 37~44.
[6] 赵鹏大, 池顺都, 陈永清. 查明地质异常: 成矿预测的基础[J]. 高校地质学报, 1996, 2(2): 61~373.
[7] 赵鹏大, 陈永清. 地质异常矿体定位的基本途径[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23(2): 111~114.
[8] Murphy J. The indicator variogram and the simple Kriging estimator: useful tools to complement lithologic correlation in a complex fluvial depositional environment [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(4): 594~599.
[9] 肖斌, 赵鹏大, 侯景儒, 等. 时空域中的指示克立格理论研究[J]. 地质与勘探, 1999, 35(4): 25~29.
[10] 侯景儒. 指示克立格的理论与方法[J]. 地质与勘探, 1990, 26(3): 28~36.
[11] 周蒂. 稳健统计学与地球化学数据的统计分析[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1991, 16(3): 273~280.
[12] Carr J R, Bailey R E. Use of indicator variograms for an enhanced spatial analysis [J]. Math Geol, 1988, (8): 797~812.

GEOSTATISTICAL STUDY OF $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ ANOMALY IN GUILAIZHUANG GOLD DEPOSIT

Xiao Bin¹ Zhao Pengda² Zhou Longmao³

(1. Department of Geology, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Department of Geology, East China Geological Institute, Fuzhou 344000, China)

Abstract: The $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ ratio, an important indicator for the evaluation of gold deposits, may provide us with some important information on the origin of the gold deposits. This paper presents the geostatistical research into $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ anomaly in the Guilaizhuang gold deposit. The indicator Kriging method is applied to the research into the distribution pattern of $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ ratio and to the location of Au occurrence positions. Finally this paper presents some suggestions for the future research in this gold deposit.

Key words: $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ anomaly; gold deposit evaluation; geostatistics; indicator Kriging method.