

# 基于地质统计学的矿山资源储量估算与评价

李晓杰 王彦淞

山东黄金矿业(莱州)有限公司三山岛金矿 山东 烟台 261442

**摘要:** 矿产资源储量估算是矿山开发的核心依据,传统方法在刻画矿化空间变异性和量化不确定性方面存在明显不足。本文系统阐述了以区域化变量理论和变异函数为核心的地质统计学基本原理,深入分析了变异函数拟合、克里金估值及精度评价等关键技术,并结合案例论述了从数据预处理到不确定性评价的完整流程。研究表明,地质统计学方法能够提供无偏最优的储量估算结果,并能定量评价估算精度与置信区间,为资源分类与风险决策提供了科学依据。

**关键词:** 地质统计学; 资源储量估算; 克里金法; 变异函数; 不确定性评价

引言:随着矿产开发向深部延伸,准确可靠的资源储量估算已成为矿山投资与生产规划的核心支撑。传统方法如地质块段法虽应用广泛,但无法刻画品位的空间变异结构,也难以量化估算的不确定性。地质统计学以区域化变量理论为基础,利用变异函数描述空间自相关结构,通过克里金法提供无偏最优估值,并借助克里金方差实现估算精度的定量评价。本文系统梳理了该方法的理论框架与技术流程,结合实际案例分析其应用效果,为矿山储量管理与风险决策提供方法支撑。

## 1 地质统计学理论基础

### 1.1 区域化变量理论

地质统计学的核心是区域化变量理论。区域化变量是以空间位置为自变量的函数,在矿山领域表现为矿石品位、厚度等属性参数,兼具随机性与结构性双重特征:随机性源于地质过程的不确定性,结构性体现为相邻样品间的空间相关性。传统统计方法难以有效处理这一双重性质,而地质统计学提供了系统分析工具。区域化变量研究通常基于平稳假设或本征假设,前者要求恒定数学期望和方差,后者仅要求增量平稳。矿山实际数据通常满足本征假设,为后续变异函数分析奠定基础。

### 1.2 变异函数理论与结构分析

变异函数是刻画区域化变量空间变异特征的核心工具,通过统计不同滞后距下样品对品位差值,反映样品间差异随距离增大而增大的规律。理论变异函数模型是对实验变异函数的数学拟合,常用模型包括球状模型、指数模型、高斯模型和幂函数模型。球状模型应用最广,其参数块金值反映采样误差,基台值代表总变异程度,变程表示空间相关有效距离。各向异性分析通过计算不同方向的变异函数,识别矿化体延伸方向与各向异性比,理论拟合需结合实际地质认识<sup>[1]</sup>。

### 1.3 克里金估值方法

克里金法是一组最优无偏线性估值方法的总称,其核心目标是在最小化估值方差的前提下给出待估块段的品位估值。普通克里金是应用最广泛的方法,适用于数据满足本征假设且局部均值未知的情况。简单克里金要求已知全局均值,适用性较窄。泛克里金可处理存在漂移的区域化变量,但计算复杂且稳定性较差。指示克里金适用于处理特异值、进行概率估计和资源分类,能够在不切断特异值的情况下估算品位分布。协同克里金引入协同变量提高主变量的估值精度,适用于主变量稀疏而辅助变量丰富的情形。克里金法相比传统方法的优势在于:充分利用样品间的空间相关性、提供无偏最优估值、同时给出估值精度指标克里金方差。不同类型的克里金方法各有适用条件,需根据数据特征和估算目标合理选择。

### 1.4 估值精度与不确定性评价

地质统计学区别于传统方法的核心优势在于能够定量评价估算不确定性。克里金方差是估算误差的理论方差,反映了估值的可靠程度,其大小受样品数量、空间分布和变异函数结构控制。克里金方差的空间分布图可直观识别估算精度较低的区域,指导加密勘探工程部署。条件模拟是另一种不确定性评价方法,通过生成多个等概率的品位实现,统计各实现之间的差异来量化不确定性。与克里金法给出平滑估值不同,条件模拟可更好地再现品位的空间变异性,适用于矿产资源分类和开采风险评价。克里金方差和条件模拟两者互为补充,前者侧重于全局精度评价,后者侧重于局部变异性再现。不确定性评价结果可为资源量分类(探明、控制、推断)提供定量依据,实现从确定性估值向概率评价的转变。

## 2 矿山样品数据采集与预处理

## 2.1 样品数据采集与统计分析

本研究共采集钻孔岩芯样品156件,品位范围为0.12%~8.45%,平均品位1.28%,标准差0.58。偏度系数0.35、峰度3.12,数据近似服从正态分布,可直接用于后续变异函数分析。样品统计特征见表1。

表1 样品描述性统计

统计指标	品位值 (%)	说明
样品数量	156	钻孔岩芯样品
最小值	0.12	—
最大值	8.45	—
平均值	1.28	—
标准差	0.58	—
偏度	0.35	近似对称
峰度	3.12	正态分布

数据检查还涉及特异值的识别与处理,常用方法包括经典统计的均值 $\pm 3$ 倍标准差法和地质统计学的累积频率分布法。本研究中未出现超出均值 $\pm 3$ 倍标准差的特异值。数据组合是预处理的重要环节,通过将不等长的样品组合为等长样品,可消除长度效应对品位统计的影响,组合样品的长度需根据矿体特征和采矿方法综合确定。

## 2.2 统计域划分与数据特化

统计域划分是指将地质特征相似、品位分布规律一致的样品归为同一统计总体进行分析。划分依据主要包括地质矿化域、岩性单元、品级区域和矿化类型等。合理的统计域划分是变异函数具有良好结构性的前提,错误的合并可能导致变异函数模型失真。统计域划分后需对各域数据分别进行统计检验,验证其分布特征的一致性。数据特化是指将样品数据从实际空间转换到标准化空间,以便于比较不同统计域之间的变异特征<sup>[2]</sup>。在建立变异函数模型时,可先将各方向数据标准化处理,拟合出各向同性模型后再转换回原空间。统计域划分与数据特化是样品预处理的高级环节,需要结合地质认识与统计分析双重判断。划分结果需通过交叉验证进行检验,确保各域内部均质性和域间异质性的合理性。

## 3 变异函数计算与建模

### 3.1 实验变异函数计算

实验变异函数计算是地质统计学分析的第一步,其质量直接影响后续理论拟合的可靠性。计算时需确定滞后距和方向容差:滞后距通常取样品平均间距的1/2至2/3;方向容差过小会导致有效样品对减少,过大则丢失方向特异性。稳定的实验变异函数应呈现从原点开始的递增形态,块金值反映原点附近的变异性。由于剖面投

影效应,实验变异函数可能在原点处表现异常,需结合地质认识判断其合理性。计算完成后,应绘制各方向的变异函数云图和玫瑰图,辅助识别矿化体的主、次延伸方向。

### 3.2 理论变异函数拟合

南北方向变异函数采用球状模型拟合,块金值0.18,基台值0.95,变程45m;东西方向变程32m,各向异性比为0.71,表明矿化体呈南北走向、东西方向变化较快。垂直方向采用指数模型拟合,块金值0.22,基台值1.08,变程18m,变异函数模型参数见表2。

表2 变异函数模型参数

方向	模型类型	块金值 (Co)	基台值 (Co+C)	变程(m)	各向异性比
南北向 (0°)	球状模型	0.18	0.95	45	1.00
东西向 (90°)	球状模型	0.18	0.95	32	0.71
垂直向	指数模型	0.22	1.08	18	0.40

### 3.3 交叉验证与模型优化

交叉验证是检验变异函数模型和估值参数合理性的重要手段,其基本思想是将样品点逐一剔除,用剩余样品点对该点进行克里金估值,然后比较估值与实测值的差异。评价指标包括平均误差(ME)和均方根误差(RMSE)。平均误差应接近于零,表明估值无系统性偏差;均方根误差与克里金方差的比例应接近1:1,表明方差估计合理。标准化克里金方差应接近于1,说明不确定性估计准确。本模型交叉验证结果显示:平均误差-0.008, RMSE与克里金方差比值0.96,标准化克里金方差1.02,各项指标均满足要求。当交叉验证结果不理想时,需调整变异函数模型参数或估值搜索策略。模型优化的常用方法包括变程的敏感度分析和各向异性比的微调<sup>[3]</sup>。

## 4 资源储量估算与验证

### 4.1 块段模型与估值参数设置

块段模型是将矿体离散化为规则的块体单元,每个块体被视为品位均质的基本估值单元。块段尺寸的确定需权衡估值精度与计算效率,尺寸过小会导致估值波动大、计算量大;尺寸过大则平滑掉矿化细节,影响边界品位控制。通常块段尺寸设置为勘探线间距的1/5至1/3,或变异函数变程的1/10至1/5。搜索椭球体参数反映了克里金估值的邻域范围,其方向与变异函数各向异性主轴方向一致,半径尺寸通常设置为变程的1至1.5倍。搜索半径内样品数量的设置也需谨慎:样品过少导致估值不稳定,过多则可能引入非局部信息稀释局部变异。估值时需分级搜索策略:第一搜索邻域内样品不足时,扩大搜

索范围至第二级或第三级。样品选择还应考虑八分体或四分体分区均匀性约束,避免估值偏向样品聚集区域。

#### 4.2 克里金估值实施

完成变异函数建模和参数设置后,即可进行块段克里金估值。估值过程涉及建立每个块段的克里金方程组并求解权重系数,计算块段品位估值和克里金方差。估值过程中需监控克里金权重的合理性:所有权重之和应为1,正权重可保证估值的无偏性;负权重虽在数学上允许出现,但可能导致负的品位估值,需限制或调整。相邻块段的估值结果应呈现平滑过渡,不应出现剧烈跳变。完成估值后,需生成品位分布图、克里金方差分布图和样品分布叠加图,便于直观审视估值结果的合理性。品位分布图应与地质认识一致,高品位区集中、低品位区连续是合理估值的表现;克里金方差应在样品密集区域小、稀疏区域大,符合直观预期。估值完成后,按不同品级区间统计矿石量、金属量和平均品位,并按照相关标准进行资源量分类。

#### 4.3 传统方法对比验证

为验证地质统计学方法的有效性和优越性,将普通克里金法估算结果与距离平方反比法进行对比验证。距离平方反比法估算矿石量为128.3万t,平均品位1.28%,金属量16422t,变异系数为0.68。普通克里金法估算矿石量为126.8万t,平均品位1.30%,金属量16484t,变异系数为0.52。对比表明,两种方法估算的矿石量相对差异为1.2%,金属量相对差异为0.4%,吻合良好;但克里金法的品位变异系数较距离平方反比法降低约24%,估值结果更为平滑稳定,表明其具有更高的估算精度和可靠性<sup>[4]</sup>。

#### 4.4 储量评价与不确定性分析

不确定性分析是地质统计学评价的重点内容,利用克里金方差的空间分布识别高风险区域,利用条件模拟生成多个等概率实现,统计各实现中各级品位的资源量

变幅,计算资源量估算的置信区间。不确定性量化结果可用于资源分类标准的制定:克里金方差小、条件模拟实现一致的区域划分为探明资源量;不确定性中等的区域划分为控制资源量;不确定性大的区域划分为推断资源量或作为远景资源。本矿山探明资源量45.2万t,平均品位1.35%,金属量6102t;控制资源量52.6万t,平均品位1.28%,金属量6733t;推断资源量29.0万t,平均品位1.24%,金属量3596t。储量评价报告需清晰呈现估算结果、方法参数、不确定性评价及风险分析内容,并定期随生产数据进行动态更新验证。

#### 结束语

地质统计学为矿山资源储量估算提供了从数据预处理、空间变异结构分析到无偏最优估值及不确定性量化的完整方法论体系。相较传统方法,地质统计学的核心优势在于将矿化品位的空间相关性纳入估值框架,并能够定量评价估算精度与置信区间,为资源分类和风险决策提供了科学依据。合理应用地质统计学方法可显著提升储量估算的科学性与可靠性。未来应推动地质统计学与机器学习、数字矿山技术的深度融合,实现资源评价向智能化、动态化方向的持续演进。

#### 参考文献

- [1]刘自立.斜楔形体积公式在矿山资源储量估算中的应用——以河南省李家门水泥灰岩矿为例[J].四川建材,2025,51(10):147-149.
- [2]宋涛,王洪智,包怡,等.基于地质多源信息的三维建模应用于露天矿山资源储量分割估算[J].矿产与地质,2024,38(3):408-417.
- [3]田明绍.矿产资源储量估算研究——以安徽省池州市某矿山为例[J].西部资源,2023(4):169-171.
- [4]朱月霞,吴龙华,侯建光,等.一种基于三维矿山模型的矿产资源储量估算方法[J].现代测绘,2023,46(z1):57-59.