

矿产资源量估算中常用方法的对比分析

刘澎

辽宁省地质矿产调查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110001

DOI:10.61369/ERA.2026020007

摘要： 矿产资源量估算属于矿产资源勘探开发的关键部分，其成果直接影响到资源是否适合开发以及开发的经济性。本文以矿产资源量估算常用方法为研究对象，从对比维度和评价标准出发，对地质块段法、剖面法、地质统计学法、机器学习法等常用方法的技术特点进行梳理。传统的方法在简单的地质条件下具有经济性及实用性，现代的智能方法在复杂的矿体中精度更好。本文的研究成果可以为不同地质环境下选择合理的方法提供理论支持，提高矿产资源评价的科学性、可靠性，为矿产资源合理开发利用提供技术保障。

关键词： 矿产资源量；估算常用方法；对比策略

Comparative Analysis of Commonly Used Methods in Mineral Resource Estimation

Liu Peng

Liaoning Province Geological Mineral Survey Institute Co., Ltd. Shenyang, Liaoning 110001

Abstract： Mineral resource estimation is a key part of mineral resource exploration and development, and its results directly affect whether the resources are suitable for development and the economic viability of development. This article takes the commonly used methods for estimating mineral resources as the research object, starting from the comparison dimension and evaluation standards, and sorts out the technical characteristics of commonly used methods such as geological block method, profile method, geostatistics method, machine learning method, etc. Traditional methods are economical and practical under simple geological conditions, while modern intelligent methods have better accuracy in complex ore bodies. The research results of this article can provide theoretical support for selecting reasonable methods in different geological environments, improve the scientific and reliable evaluation of mineral resources, and provide technical support for the rational development and utilization of mineral resources.

Keywords： mineral resources; common estimation methods; comparison strategy

矿产资源是国民经济发展的基础性物质条件，对资源开发规划、投资决策、生态保护等各方面都起着重要的影响作用。随着矿产资源勘探向深部、复杂的矿体延伸，传统估算方法精度不足、适应性不强的问题逐渐暴露出来，新兴智能算法的涌现给这一问题提供了一种新的解决途径。目前矿产资源量估算方法既有传统又有现代的，但是各种方法适用的场景不同，随意选用会造成估算结果出现误差，造成资源浪费或者投资风险。因此，对常用估算方法进行比较分析有着十分重要的现实意义。本文主要界定估算方法的主要概念和发展史，确定对比的原则和维度，从理论、实践等方面对各种方法进行全方位的比较，最后提出方法选择的改善策略，供行业借鉴。

一、矿产资源量估算方法概述

（一）估算方法的核心定义与内涵

矿产资源量估算，就是指依照地质勘探所取得的钻孔、坑道、物探化探等数据，联系矿体的地质特征，采用科学的数学模型或者地质推理方法，对矿体中矿产资源的数量、质量以及空间分布展开量化核算的过程。核心内涵包含三个关键要素：数据支撑的客观性，所有的估算都必须以实测地质数据为依据，不能凭

主观臆断；模型选择的匹配性，要根据矿体形态、产状和地质复杂程度来选择相适应的估算模型；结果的概率性，由于地质体比较复杂，所以估算的结果一般会以一定的置信度来表示^[1]。

（二）常用估算方法的分类与核心范畴

依据估算原理及技术特征的不同，矿产资源量估算的方法大体可以分为四类，每类方法都有着不同的适用范围和适用环境。第一类是几何类方法，以地质块段法、剖面法（包括平行剖面法、垂直剖面法）为主，基本原理是根据地质勘探工程圈定的矿

体边界,用几何形态计算矿体体积,然后乘以矿石平均品位得到资源量。这类方法主要是对形态规则、产状稳定的简单矿体进行处理,如层状、似层状沉积型矿产,有计算简单、形象易解等优点。第二类为统计类方法,包括地质统计学法(克里金法、协同克里金法)、距离加权法等,主要原理是通过对地质变量(品位、厚度等)的空间相关性进行分析,建立变异函数模型,用统计推断来估计资源量^[2]。核心范畴就是地质变量空间分布不均、但是有一定相关性的矿体,比如脉状、透镜状内生金属矿产。

(三) 估算方法的核心影响因素分析

矿产资源量估算结果的准确性受到很多因素的影响,不同的估算方法对各个因素的敏感程度也不同,主要影响因素有四个。地质数据质量,比如勘探工程密度、取样精度、分析测试误差等等,这是所有估算方法的基础。对于几何类的方法来说,钻孔间距太大容易造成矿体边界圈定偏差;对于统计类的方法来说,样本数据的代表性会影响变异函数模型的可靠度,进而影响估算精度^[3]。

二、矿产资源量估算方法对比分析的意义

(一) 指导矿产勘探开发实践的应用

在矿产勘探开发过程中,选择估算方法是否科学,直接影响着矿产项目的经济效益和资源利用效率,对比分析的应用价值也很高^[4]。在勘探阶段,根据不同的方法适用条件以及数据需求,按照勘探工程的进展情况,选择合适的估算方法。勘探初期数据少时用地质块段法快速估算资源量,为后续勘探工程部署提供依据;勘探后期数据充足时用地质统计学法提高估算精度,为矿山建设可行性研究提供准确的数据。开发阶段,对开采设计及资源回收的开采设计与资源回收策略进行对比。根据各个矿体区段的地质特点来比较选取最适合的估算方法,精确计算分区的资源量,指导采矿方法的选择和爆破参数的设计^[5]。品位分布不均匀的矿体,利用智能算法可以精确定位高品位矿段,提高采矿回采率。同时对比分析可以降低投资风险,利用不同的方法互相验证,减少由于某一种方法的估算偏差造成的决策失误,比如某金矿项目采用地质统计学法和神经网络法进行对比验证,修正了原估算结果的15%偏差,防止了过度投资^[6]。

(二) 规范矿产资源管理的行业

从行业管理的角度来说,估算方法比较分析对规范矿产资源管理秩序、提高管理效率起着重要的作用。目前在矿产资源储量评价方面,由于各个单位采用的方法不一样,在估算上结果大相径庭,影响了储量评价的公正性、权威性。开展系统对比分析,能确定各种地质条件下推荐的估算方法和验证标准,给储量评审赋予一致的技术依照,缩减评审争议。以沉积型煤矿为例,就地质块段法为基础方法、地质统计学法为验证方法的提高评审效率。并作对比分析,能促进矿产资源管理标准化、信息化。通过了解各个方法所需的数据及输出格式,对需要上报的资源量数据进行规范,为建立全国矿产资源储量数据库提供统一的数据接口。另外,对比分析有利于资源税征收、资源有偿使用等政策的

制定和实施,以资源量的准确计算来保证税费征收的公平。该省用对比分析法开展煤炭资源标准化估算工作,规范了煤炭资源储量核算工作,将20%的资源税征收率提高到行业监管加强^[7]。

三、矿产资源量估算常用方法的对比策略

(一) 对比指标体系的构建原则与逻辑

科学构建对比指标体系,保证估算方法的对比分析客观有效,需遵循四个原则。科学性原则是指指标要符合估算方法的核心技术特点,基于地质统计学、数学建模等理论基础,不能主观随意。估算精度指标要用均方根误差(RMSE)、相对误差等定量参数来表示,不能用定性描述。系统性原则,指标体系要涵盖方法全过程的特征,理论基础、数据需求、运算过程、结果输出都要有,形成全面的评价维度,不能片面^[8]。第适用性原则,指标要适应各种类型估算方法的特点,兼顾传统方法和现代智能方法的区别。对于几何类方法设置“形态适配性”指标;对于智能算法类方法设置“数据适应性”指标。可操作性原则,即指标要具有明确的量化标准或分级标准,便于数据获取和比较分析。指标体系的建构逻辑遵循的是以目标为导向、维度分解、指标细化的路径:目标为科学选择估算方法,拆解成理论可行性、实践适用性、精度可靠性、效率经济性四个维度,每个维度下面再分出2到3个具体指标,构成10项核心指标的对比体系。

(二) 多维度对比分析的实施步骤与流程

多维度对比分析的开展要遵照标准化流程,保证分析过程规范,结果可信,包含四个步骤。第一步就是数据收集,搜集8种典型方法的技术资料、行业应用案例和试验数据,选取3个不同的地质类型的矿体(简单层状铁矿、中等复杂脉状铜矿、复杂透镜状金矿)做实验对象,得到各个矿体的钻孔数据、品位分析数据、地质剖面图等基本资料。第二步为指标量化阶段,对构建的10个对比指标,用“定量+定性”的方式来量化评分,定量指标(估算精度、运算效率等)用试验计算得到的数值,定性指标(操作复杂度、地质适配性等)用5分制评分。第三步是对比分析阶段,采取“单指标对比-多指标综合评价-案例验证”的层级对比方式。单指标对比确定各方法的优势指标和短板指标,多指标综合评价采用层次分析法(AHP)确定指标权重,求出各方法的综合得分。案例验证把不同方法应用于三个试验矿体,比较实际开采数据和估算结果之间的偏差。第四步就是结果梳理阶段,把各方法适用的条件、精度阈值和应用建议进行总结归纳,形成对比分析矩阵和可视化对比图表,增加结果的可读性和实用性^[9]。

(三) 复杂地质条件下的方法选择与优化策略

复杂地质条件指的是矿体形态复杂(透镜状、脉状分叉)、产状多变(倾角大于60度)、品位呈非线性分布、构造发育(多断层、褶皱)的场景,比如内生脉状金矿、铜镍硫化物矿床等。此时方法选择以精度优先、模型匹配为原则,建议使用地质统计学法(克里金法、协同克里金法)、智能算法(神经网络法、随机森林法)或者数值模拟法三维建模验证。克里金法的优化策略有:建立准确的变异函数模型,根据品位的空间分布特点选择球

状、指数或者高斯模型，通过交叉验证调节变程、基台值等参数，保证模型的拟合度 R^2 大于0.85；采用辅助变量（物探化探数据、矿体厚度）的协同克里金法，提高低勘探密度区的估算精度。

实践案例，某脉状金矿的矿体呈透镜状分叉，受3条断层切割，品位变动区间为1g/t ~ 20g/t，用协同克里金法来估算，将钻孔品位数据当作主要变量、物探激电异常值当作辅助变量、创建球状变异函数（变程50m、基台值15），三维建模分成120个块段，测得资源量为8.5吨。用随机森林法检验，估算结果为8.3吨，偏差率为2.35%。开采后实际资源量为8.2吨，综合偏差率是3.66%，与传统剖面法（偏差率为12.1%）相比，精度提高了许多。优化注意事项，复杂构造地区应该增多钻孔控制，断层附近分开一个块段防止构造对品位造成影响^[10]。

（四）数据稀缺场景下的方法选择与弥补措施

数据稀缺场景主要出现在勘探初期、深部勘探和偏远矿区，这时数据很少或数据覆盖不全，因此方法的选择要以数据适应性强、外推性好为原则，采用剖面法（垂直剖面法）配合地质类比法或者少量样本的机器学习方法（支持向量机法）。剖面法的应用补救措施有三条，利用区域地质资料延长剖面，根据邻近矿区矿体产状类比，合理外推矿体边界，外推距离不大于已知剖面长度的1/3；用趋势面分析修正品位数据，建立多项式趋势面剔除局部异常值，提高品位平均值的可靠性；采用间接数据（遥感蚀变信息、重磁异常数据等）辅助圈定矿体范围，减小边界圈定误差。

深部铜矿区在勘探初期只做了5个钻孔（间距300米），数据很少使得矿体形态不清楚，用垂直剖面法和地质类比法进行估算。首先根据相邻矿区的层状矿体产状确定本区矿体倾向（35°）、倾角（45°），延长剖面至钻孔控制范围外100m；采用二次趋势面分析修正品位数据，剔除1个高品位异常值（5.2%），得到平均品位1.8%；结合重磁异常圈定矿体宽度（平均25m），估算资源量32万吨。后续加密了10个钻孔以后，用克里金法重新估计得到资源量30.5万吨，偏差率为4.68%，符合勘探初期的决策要求。弥补注意事项：外推范围需明确标注，估算结果要注明推测资源量，不能作为最后的开采依据。

四、结束语

综上所述，不同的估算方法各有优缺点，地质块段法适用于简单矿体，经济性好，克里金法对中等复杂矿体精度最高，神经网络法适合于复杂深部矿体，科学选择的方法要以地质条件判断的准确、对方法特性认识充分为前提。本文的对比分析框架以及选择策略可以给行业实践给予有效的引导，但是也存在一些不足，没有包含最新的深度学习方法，对于极端地质状况下的方法研究不够。未来的发展方向是智能算法与地质规律深度结合起来，构造适应不同地质场景的混合估计模型，促进矿质资源估量的标准化和国际化，提高我国矿质资源评估整体水平。

参考文献

- [1] 黄博韬. 矿产资源储量核查在矿政管理中的价值与应用 [J]. 世界有色金属, 2024, (19): 91-93.
- [2] 吴鹤. 矿山勘查过程研究 [J]. 世界有色金属, 2024, (19): 169-171.
- [3] 孔德志, 孟凡永. 提高矿产资源储量估算精度的方法探讨 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (17): 68-70.
- [4] 黄博韬. 矿产资源储量估算方法及其准确性研究 [J]. 世界有色金属, 2024, (17): 40-42.
- [5] 李欣. 地质矿产勘查中的资源储量估算与评估方法研究 [J]. 中国金属通报, 2024, (08): 128-130.
- [6] 马良, 江健华, 祁轶宏, 等. 指示克里格矿产资源量三维估算方法应用研究——以安徽省某斑岩型铜金矿床为例 [J]. 河北地质大学学报, 2024, 47(05): 14-20.
- [7] 冯波, 刘曦遥, 王学鹏, 等. 埋宁隆起区寒武系—奥陶系岩溶热储资源评价 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(05): 1521-1533.
- [8] 张敏. 几何法与地质统计学法在矿产资源量估算中的对比分析 [J]. 西部探矿工程, 2023, 35(08): 76-78.
- [9] 李坤. 莱卡背包式三维激光扫描仪在矿产资源储量估算中的运用分析 [J]. 世界有色金属, 2023, (06): 175-177.
- [10] 王明, 柳顺彬. MapGIS 与 Excel 软件在固体矿产几何法资源量估算中的应用 [J]. 新疆地质, 2023, 41(01): 126-131.