

文章编号:1000-582X(2012)07-119-08

三维空间传统方法资源储量可视化动态估算及应用

陈国旭^{1,2}, 张夏林², 田宜平², 吴冲龙²

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 中国地质大学 计算机学院, 武汉 430074)

摘要:针对传统方法资源储量动态估算存在的可视化及分析程度低、估算精度有待提高等问题,以矿山日常勘探与开发工作流程为主线,运用三维可视化技术对传统资源储量估算实现方式、方法进行改造,借助真实的三维地质几何模型取代抽象的规则几何体,研究并实现了一种新的适合中国资源勘查及储量分类特点的资源储量三维可视化动态估算及分析方法,可使传统资源储量估算方法科学、可视地贯穿于矿山勘探与开采整个工作流程。经实际矿山应用对比表明:矿体动用储量估算结果较大程度上受矿体块段及采空区空间位置、形态及厚度分布影响,基于勘探工程实际空间位置构建三维矿体块段及采空区模型进行资源储量动态估算与核减可有效提高传统方法资源储量动态估算的科学性与估算精度。

关键词:矿产勘查开发信息化;传统方法;资源储量动态估算;三维矿体块段模型;可视化分析
中图分类号:P628;P209 **文献标志码:**A

Traditional mineral resource visualized dynamic estimation and its application in 3D geological space

CHEN Guoxu^{1,2}, ZHANG Xiaolin², TIAN Yiping², WU Chonglong²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Computer, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: A new method for traditional mineral resource visualized dynamic estimation in 3D geological space is proposed, which is adaptive to the characteristics of resource exploitation and reserve classification in China. The method follows the daily workflow of mine exploitation, improves the traditional method for resource estimation by 3D visualization technologies, and replaces abstract regular geometries with real 3D geological models. Thus, the traditional method for resource estimation realizes visualization in the whole workflow of mine exploitation. The application results to some real mines show the estimation results are mainly affected by the spatial location, shape and thickness of mineral blocks and goaf. If the resource dynamic estimation is carried out by constructing 3D mineral models in consistent with real exploitation project, the accuracy of the traditional method can be effectively improved.

Key words: mineral exploration; traditional methods; mineral resource dynamic estimation; 3D geological models; visualization

收稿日期:2012-02-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40802082);福建紫金矿业集团“数字矿山”资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011HGBZ1283)

作者简介:陈国旭(1983-),男,中国地质大学博士、合肥工业大学在站博士后,讲师,主要从事资源勘查与开发信息化方面教学与科研工作,(E-mail) chenguoxu1983@163.com。

矿产资源储量估算方法目前主要分为 2 大类^[1]:一类是以几何计算为基础的传统方法;一类是以统计学为基础的地质统计学方法。传统方法在不同条件下的具体估算方法有:等值线法、算术平均法、剖面法、地质块段法、三角形法、多角形法,以及基于传统方法改进发展而来的 SD 法、CS 法等。中国矿山在勘查和开采阶段都普遍采用传统方法;西方主要矿业国家则采用地质统计学方法,传统方法主要用于早期矿产资源勘查评价及后期地质统计学方法估算结果的对比验证^[2-4]。地质统计学方法引入三十多年来,虽取得了一定的效果,但由于该方法对勘探数据的质与量及估算人员的专业知识要求较高,不太适合中国的国情,一直难以推广。相比之下,传统资源储量估算方法具有应用广泛、方法简便、易于掌握、能充分发挥地质工作者主观能动性等优点,非常适合中国的找矿、采矿实际情况;特别是在早期的普查、详查阶段,勘探工程密度不大等情况下,该方法具有很大的优势,可在获得有限勘探资料的基础上,迅速开展资源储量估算;尤其对于仅需获取矿石量的非金属矿床,适合中国资源储量分类特点的传统方法具有明显优势。因此,在目前矿产勘查方式及经济技术条件下,传统资源储量估算方法相对地质统计学方法虽存在可视化及分析程度低、估算精度有待提高等问题,但仍然是矿山资源储量估算的主要方法,在国内有着广泛的应用前景和地质统计学方法不可替代的优点。

能否真实客观地反映矿体空间形态是资源储量估算具体方法选择及科学性评价的主要依据。传统资源储量估算方法以二维平面图件为基础,通过将矿体划分为若干块段并抽象为规则的几何体(如棱台、梯台、棱柱、锥体等)来估算资源储量,而抽象的规则几何体难以准确、有效表达形状复杂的矿体;同时,利用二维平面,矿体块段空间划分的科学性及其空间形态分布也往往难以有效表达。特别是随着三维可视化技术的发展及矿山生产勘探与开采工作的深入,矿山传统平面方式资源储量动态估算与核减问题日益突出。因此,面对传统资源储量估算方法急需进一步完善与发展的现状,将传统方法资源储量估算拓展到三维空间,研究适合中国资源勘查及储量分类特点的三维空间传统资源储量可视化动态估算方法具有重要的现实意义。

真三维环境下的传统资源储量动态估算是传统方法资源储量估算未来发展的必然趋势。国内三维空间传统资源储量动态估算研究尚处于起步阶段,

目前的研究主要集中在简单的三维环境实现,并没有从根本上提高其估算精度及可视化分析程度。针对传统资源储量动态估算过程中存在的可视化及分析程度低、估算精度有待提高等问题,笔者以矿山日常勘探与开发工作流程为主线,运用三维可视化技术对传统资源储量估算实现方式、方法进行改造,借助真实的三维地质几何模型取代抽象的规则几何体,研究并实现了一种新的适合中国资源勘查与开采特点的资源储量三维可视化动态估算方法;从而进一步提升传统资源储量估算方法的科学性、估算精度、可视化分析程度及生命力,使传统资源储量估算方法科学、可视地贯穿于矿山勘探与开采整个工作流程。

1 传统资源储量估算一般过程

1.1 传统资源储量估算流程

传统方法是上世纪 50 年代从前苏联引进的一套较为简易的资源储量估算方法。虽然不同传统方法的特点和应用方式不同,但它们都遵循一个基本原则,即把形状复杂的矿体转化为与其体积大致相等的简单形体,并将矿化复杂状态变为影响范围内的均匀化状态,从而估算其体积、资源储量等。

在中国,较为常用的传统资源储量估算方法主要有地质块段法、剖面法等,其一般估算过程如图 1 所示,具体为^[1]:

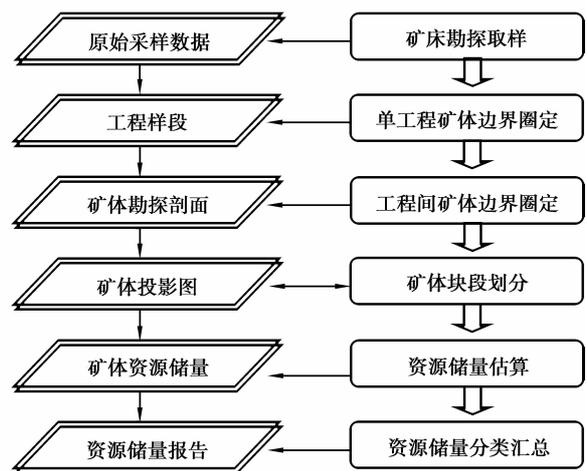


图 1 传统资源储量估算一般过程

1)以原始采样数据为基础,进行单工程及工程间矿体边界圈定,编制勘探线剖面图。

2)以绘制的矿体投影图底图为基础,根据勘探工程划分矿体块段,编制矿体投影图。

3)根据块段划分情况建立矿体块段,估算矿体

块段体积。

4)估算矿体块段的矿石量

$$Q = V \times D, \quad (1)$$

式中: Q 为矿石量; V 为体积; D 为矿石体重。

5)估算矿体块段的金属量

$$P = Q \times \bar{C}, \quad (2)$$

式中: P 为金属量, \bar{C} 为平均品位。

6)资源储量进行分类汇总。

1.2 传统资源储量估算方法优点

传统资源储量估算方法已有近百年的发展历史,是中国资源储量估算的基本方法,引入中国60余年来经不断发展完善已逐渐成熟,其主要优点为:

1)符合国家及行业标准。地矿工作的标准化是实现地质信息共享、地矿勘查成果高效利用的前提和基础。现阶段执行的国家及行业标准大都以传统资源储量估算方法为基础,适合中国资源储量分类特点及用户习惯的传统方法具有明显优势。

2)适用性强。传统方法相对地质统计学更适合国内中小型矿、贫矿多的特点,如果矿床参数是纯随机的或非常规则的,就不宜或不使用地质统计学法。同时,地质统计学法虽可最大限度地利用勘探工程所提供的信息,但在勘探工程密度相对较低或较高的情况下其优势不能很好体现^[5-6]。

3)理论及操作简便。地质统计学法对估算人员的专业知识要求较高,如变差函数的拟合、特高品位的处理等;而传统方法以地矿勘查图件为估算底图,估算方法相对成熟,操作简单灵活。

4)专家交互性强。由于地质过程及其产物在大多数情况下不可能被全面观测或直接研究,因而在地矿工作中常需要依靠地质专家的经验知识进行判断、推理与预测。传统方法可在估算的各环节充分发挥地质工作者的主观能动性,如矿体边界圈定、矿体块段划分等,估算过程的专家交互可把地质经验与客观计算融为一体。

5)估算过程与成果表达直观。传统方法资源储量估算与地矿勘查图件编制相辅相承,资源储量估算完成后即可完成地矿勘查平面图件及报表编制,估算过程与结果均是直观的。

6)应用广泛。国内现阶段绝大多数的地矿工作者使用传统方法进行矿床资源储量评价,它是矿产资源储量核实及评审的基本方法,应用前景广阔。

2 三维空间传统资源储量估算实现模式

通常,矿体的资源储量由其体积、体重及品位决

定;如何科学有效地获取矿体的真实资源储量是围绕着科学获取其体积、体重及品位进行的。由于获取矿体的形态、产状及空间分布等特征需要大量的勘探工作,在勘探工程有限的情况下,人们只能通过各种技术方法来估算其体积与品位,以求能够接近其真实资源储量。传统资源储量估算方法常通过压缩矿体剖面面积或厚度等方式实现矿体块段划分并抽象为规则的几何体来获取矿体体积,难以准确、有效表达形状复杂的矿体;而地质统计学方法则利用一系列相同尺寸的立方块体来表达矿体,对矿体边界的判断也会产生较大误差。传统方法与地质统计学方法的根本区别在于矿体品位估值方式,克里格估值虽然目前被公认为一种较为科学的估值方法,但在勘探工程密度相对较低或较高的情况下,其优势相对传统品位估值方式并不明显^[5-6]。目前,三维空间传统资源储量估算方法研究主要倾向于简单的三维环境实现,即在三维可视环境下,完全依照传统二维平面资源储量估算思路,仍将矿体抽象为规则的几何体来获取资源储量。该模式虽改善了传统资源储量估算实现方式,有效提高了传统方法的可视化程度,具有估算过程及结果直观、简便等优点,但没有从根本上提高传统资源储量估算方法的估算精度及可视化分析程度。同时,由于传统资源储量估算方法的体积获取方式存在明显不足,传统方法拓展到三维空间后,应依据传统资源储量估算原理,借助三维可视化技术改进其体积获取方式,从而有效避免体积误差,提高传统资源储量估算方法的科学性及估算精度。

三维空间传统资源储量估算研究的根本目的在于提高传统资源储量估算方法精度及可视化分析程度。其创新思路主要体现在估算方式、方法改进及一体实现2个方面:1)借助三维可视化技术系统性地改进其实现方式,即在完全可视的环境下进行传统方法资源储量动态估算及分析,实现集地矿平面图件编制、三维地质建模、多时态资源储量核减于一体的传统方法资源储量估算多维空间一体化与可视化动态贯穿;2)运用三维可视化技术改进其估算方法,即借助真实的三维地质几何模型取代抽象的规则几何体以提高其体积获取精度,从而精确获取矿石资源储量。两者相互依存,相互联系,其一体实现模式不仅可以保留传统资源储量估算方法的优势,如充分发挥地质工作者主观能动性,估算过程直观、简便等;而且可有效提高传统资源储量估算过程及结果分析的可视化程度,科学、快捷地解决不断勘探与开采的矿山传统资源储量估算模式下的动用储量

精确核减、边界约束(如断层、矿权及开采边界等)条件下的矿体资源储量估算等问题,从根本上提高传统资源储量估算方法的精度及生命力,使传统资源

储量估算方法科学、可视地贯穿于矿山勘探与开采整个工作流程。三维空间传统资源储量估算实现模式如图 2 所示。

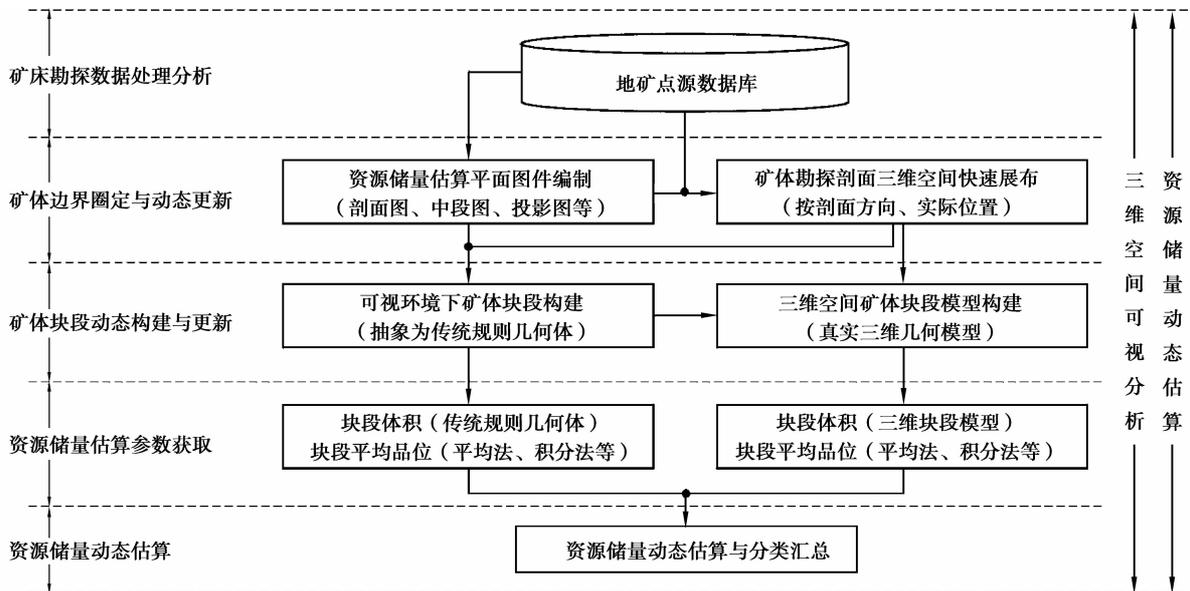


图 2 三维空间传统资源储量估算实现模式

2 传统资源储量估算三维可视化分析

地质体三维建模与可视化技术^[7-11]的快速发展,给地矿工作信息化^[12-13]与数字矿山^[14-16]注入了新的活力,使人们可以直接、完整、准确地理解和认识地质规律和矿体空间分布规律。传统矿体块段划分以二维平面图件为基础,地质工作者不易直观、有效地观察矿体形态、产状及储量信息,难以实现矿体块段科学划分、资源储量分析及矿山开采设计的实时直观互动。因此,实现传统资源储量估算过程及结果分析的全程可视化对于矿山资源储量动态评价及开采设计具有重要的现实意义。

矿体块段科学划分是传统资源储量估算的一个重要环节,矿体块段空间划分的科学性直接影响着资源储量估算结果,是传统资源储量估算三维可视化分析的前提和基础。目前国内常用的传统资源储量估算方法为剖面法和地质块段法,其估算底图分别为勘探线剖面图和矿体投影图。传统资源储量估算方法拓展到三维空间后,三维矿体块段成为矿体空间分布及储量表载体,其模型实时快速构建是三维空间传统资源储量估算方法实现及应用推广的前提。通常,传统矿体建模以三维矿体剖面或钻孔数据为基础,需要人工交互将平面图件展布到三维空间,速度较慢且精度多受人为因素影响,严重阻

碍了传统资源储量估算的三维空间拓展。地矿勘查图件编制与三维地质建模的多维空间一体化技术为三维空间传统资源储量估算实现提供了保障,其实现可有效提高三维矿体块段模型构建的速度与质量。利用空间数据转换技术,将常规的地矿勘查平面图件按平面方向或空间实际位置自动展布到三维空间后(见图 3),依据传统资源储量估算原理即可实现基于矿体三维勘探剖面的矿体块段实时快速划分,如图 4 所示。

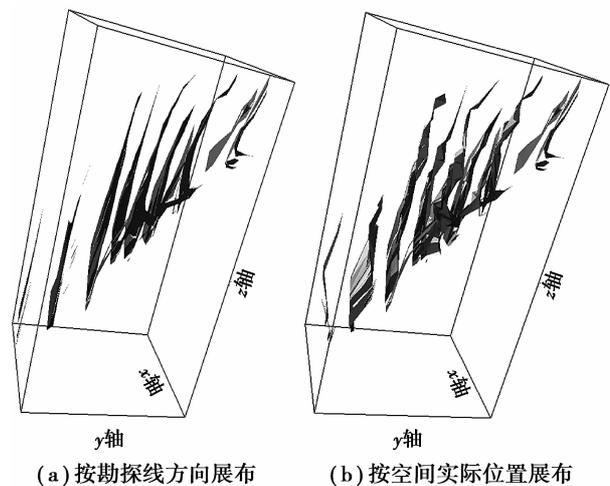


图 3 矿体勘探剖面三维空间自动展布辅助矿体模型构建

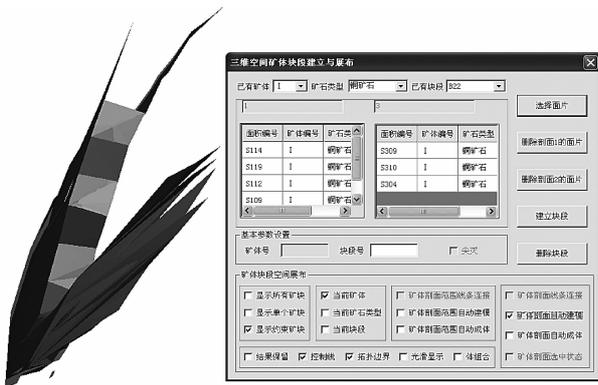


图 4 基于矿体勘探剖面的矿体块段三维空间快速划分

借助三维矿体块段模型,矿体块段划分及估算结果得以直观表达。针对不同方式的矿体块段划分及估算结果,如基于常规平面图件(勘探线剖面图、矿体投影图等)或三维空间勘探数据(三维矿体剖面、三维钻孔等),借助三维空间数据快速转换及建模技术均可实现矿体块段三维空间快速自动展布分析,使矿体块段的空间形态、产状、厚度、品位、精度等信息的可视化分析与表达成为可能,从而实现传统资源储量估算成果表达及分析的可视化。基于传统勘探剖面的矿体块段三维空间自动展布分析如图 5 所示,基于矿体投影图的矿体块段三维空间自动展布及厚度分析如图 6 所示。

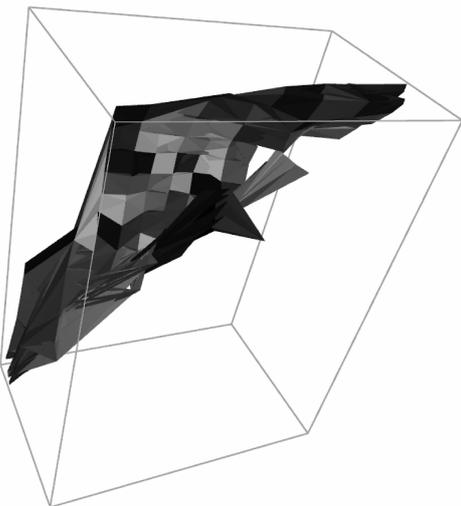


图 5 基于传统勘探剖面的矿体块段三维空间自动展布分析

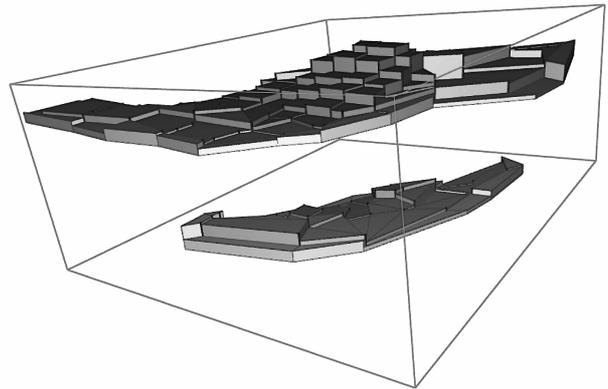


图 6 基于投影图的矿体块段三维空间自动展布及厚度分析

3 三维空间传统资源储量动态估算方法

在促进传统资源储量估算过程及结果全程三维可视化的同时,三维空间传统资源储量方法可有效解决不断勘探与开采的矿山传统资源储量估算模式下的资源储量科学动态估算与核减问题。不同传统方法划分的矿体块段在三维空间往往可归结为同一地质实体,从根本上是统一的;将采空区抽象为规则几何体代替客观存在的采空区空间实体进行资源储量核减也是不科学的。因此,借助三维地质模型对传统资源储量动态估算与核减方法进行改造,基于三维空间关系实现相对精确的资源储量动态估算与核减具有重要的现实意义。它是发挥传统资源储量估算方法优势,提高传统资源储量动态估算精度与生命力的一种有效途径。

三维空间传统方法资源储量动态估算实现的关键在于利用真实的三维地质模型取代抽象的规则几何体。利用三维空间快速展布的矿体勘探剖面及钻孔数据实现三维矿体块段模型快速构建,进而依据矿体块段模型与采空区模型的空间位置关系及几何形态实现三维空间传统资源储量动态估算与核减;其实现可有效避免传统二维平面估算模式下的体积压缩及平均厚度核减方式误差,三维空间矿体块段资源储量动态核减如图 7 所示。

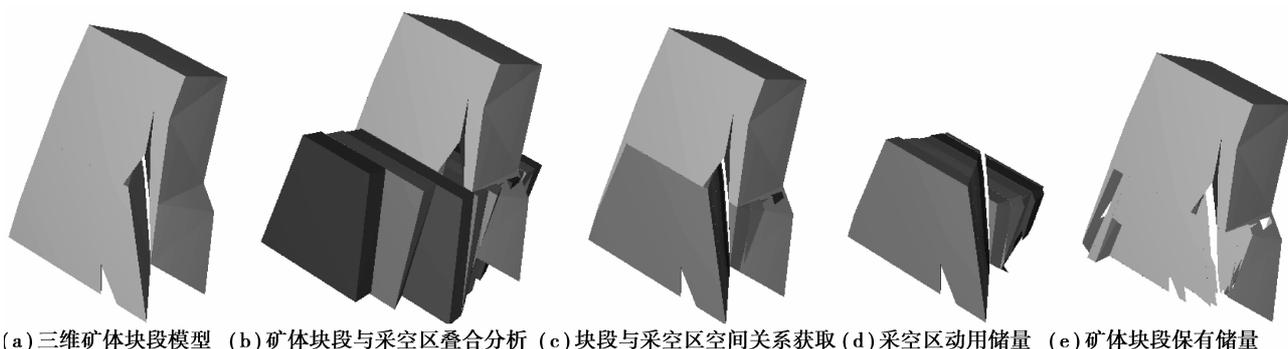


图 7 三维空间矿体块段资源储量动态核减

4 方法实现及应用对比

4.1 方法实现

依据三维空间传统资源储量动态估算方法,实现了矿产资源勘查与开发软件 QuanyMine^[17]的三维空间传统资源储量动态估算与分析功能。它不仅可以快速实现三维空间矿体块段建立、空间展布分析及资源储量动态估算,而且还提供了一系列基于地矿勘查平面图件(如勘探线剖面图、矿体投影图等)及三维空间勘探数据(如三维勘探剖面、钻孔等)的矿体块段三维可视化模型快速构建辅助工具。该功能实现了传统资源储量估算方法的多维空间一体化与可视化,从根本上提高了传统资源储量估算方法的精度与可视化分析程度,为用户提供了一个基于传统方法的资源储量三维可视化动态估算与核减平台。

4.2 应用对比分析

为验证该方法的科学性与必要性,以福建紫金矿业集团贵州水银洞金矿某年度的勘探与开采数据为例,选取该矿区某主矿体进行资源储量动态估算应用对比分析。该矿体为层控型,倾向南或北,倾角 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$,为构造-热液成矿,金以包裹金形式存在,部分勘探工程偏离勘探线且矿体处于开采阶段,适合传统方法资源储量动态估算应用对比分析。参与对比的传统方法实现环境分别为二维平面与三维空间,具体如下:

1) 垂直剖面法。该方法以勘探线剖面图为估算底图,根据相邻勘探剖面形状将矿体抽象为特定的规则几何体,如棱台、梯台等;该方法在一定程度上反映了矿体的空间形态,但忽略了勘探工程偏离勘探线时导致的矿体形态差异,如图 8(a)所示。

2) 地质块段法。该方法以矿体投影图为估算底图,将矿体抽象为若干规则的棱柱体;该方法估算过程简便,但矿体的空间形态没有被充分地反映,如

图 8(b)所示。

3) 基于勘探线方向展布的勘探工程构建三维矿体块段模型并估算资源储量。该方法建立的矿体块段模型以沿勘探线方向展布的三维勘探剖面或工程为基础,是目前三维矿体模型构建的主要方式。估算使用的矿体块段模型虽一定程度上反映了矿体空间形态;但当勘探工程偏离勘探线时,三维矿体块段模型仍不能较好地反映矿体真实空间形态,如图 8(c)所示。

4) 基于勘探工程实际空间位置构建三维矿体块段模型并估算资源储量。基于勘探工程实际空间位置构建的矿体块段模型以三维实际勘探剖面或工程为依据,相对较精确地反映了矿体真实空间几何形态,如图 8(d)所示。

以各方法估算结果的算术平均值为参考求取各方法的相对误差。经对比,地质储量各类别结果接近,动用储量各类别差异明显,如图 9、10 所示。地质储量各类别差异主要源于不同估算方法矿体块段体积获取方式及勘探工程偏离勘探线时的处理方法,各方法地质储量估算结果符合传统资源储量估算要求。然而,在地质储量各类别基本接近的情况下,动用储量各类别估算结果差异明显:考虑到矿体块段与采空区空间位置关系及几何形态的三维空间矿体动用储量估算结果与常规二维平面平均厚度方式核减结果 333 资源量相差可达 48.81%;基于勘探线方向展布的勘探工程构建三维矿体块段模型进行资源储量动态估算结果与勘探工程实际空间位置核减结果 333 资源量相差达 26.48%,矿体动用储量估算结果较大程度上受矿体块段及采空区空间位置、形态及厚度分布影响。各方法估算结果对比分析表明:依据矿体块段及采空区空间位置、形态及厚度分布,基于勘探工程实际空间位置构建三维矿体块段及采空区模型进行资源储量动态估算与核减具有重要意义,其实现可有效提高传统方法资源储量

动态估算的科学性与估算精度。

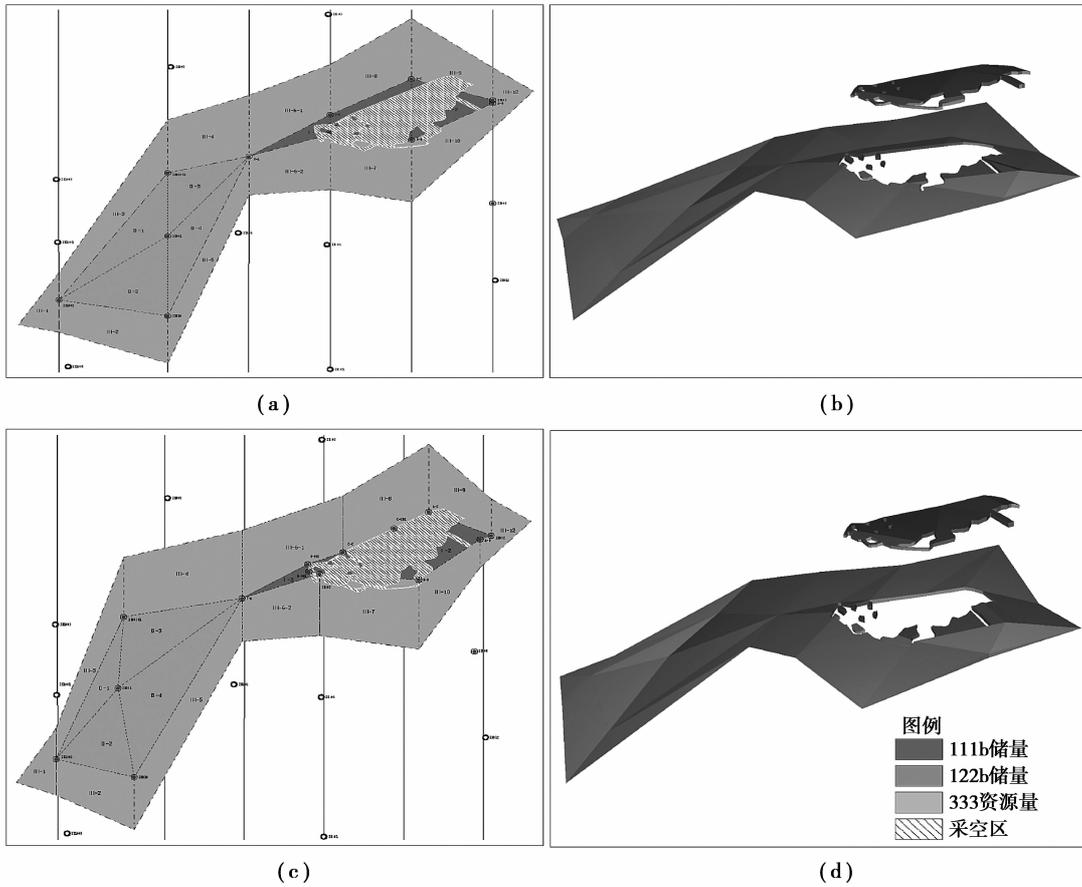


图 8 三维空间传统资源储量动态估算方法实现及应用对比分析

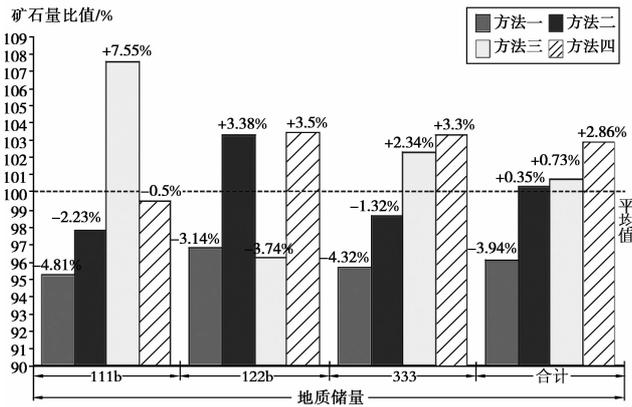


图 9 水银洞金矿某主矿体地质储量估算结果对比分析

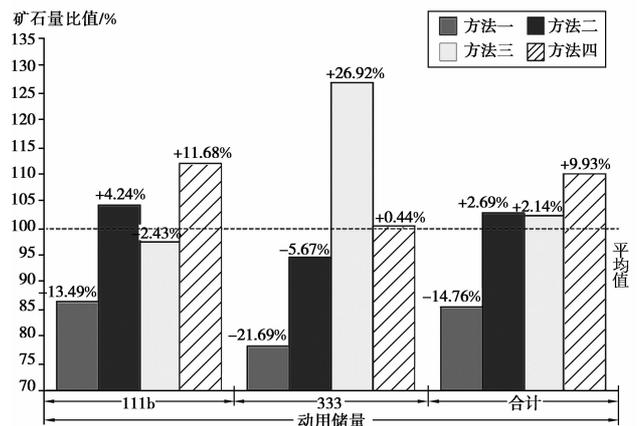


图 10 水银洞金矿某主矿体动用储量估算结果对比分析

5 结 论

1) 真三维环境下的传统方法资源储量动态估算已成为中国资源勘查与开发信息化发展的必然趋势。借助三维可视化技术对传统资源储量估算实现方式进行系统地改进,采用多维空间一体化方式

实现了完全可视环境下的传统方法资源储量动态估算及储量分析,使三维空间传统方法资源储量动态估算方便、快捷地实现成为可能。

2) 依据传统方法资源储量估算原理,以矿山日常勘探与开发工作流程为主线,运用三维可视化技

术对传统资源储量估算方法进行改造,借助真实的三维地质实体模型取代抽象的规则几何体,从根本上提高了资源储量动态估算及分析精度,使传统资源储量估算方法科学、可视地贯穿于矿山勘探与开采整个工作流程。

3)经实际矿山二维平面与三维空间资源储量动态估算对比分析表明:在地质储量各类别基本接近的情况下,动用储量各类别可差异明显,动用储量估算精度较大程度受矿体块段及采空区空间位置、形态及厚度分布影响,基于勘探工程实际空间位置构建三维矿体块段及采空区模型进行资源储量动态估算与核减具有重要的现实意义。

4)经 QuantyMine 数字矿山软件功能实现及实际矿山应用表明,三维空间传统方法资源储量可视化动态估算及分析结果准确可靠,该方法提高了传统资源储量估算的科学性、估算精度、可视化分析程度及生命力,可有效解决矿山在不断勘探与开采过程中所面临的资源储量动态估算与核减问题,从而为矿山资源储量可视化动态评价及开发提供科学的决策支持。

参考文献:

- [1] 赵鹏大, 池顺都, 李志德, 等. 矿产勘查理论与方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2001.
- [2] Sinclair A J, Blackwell G H. Applied mineral inventory estimation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [3] Moon C J, Whateley M K G, EVANS A M. Introduction to mineral exploration [M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2006.
- [4] Wellmer F W, DALLHEIMER M, WAGNER M. Economic evaluations in exploration [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [5] Krige D G. A study of gold and uranium distribution patterns in the Klerksdorp gold field [J]. Geosurveying, 1966, 4(1): 43-53.
- [6] 唐义, 蓝运蓉. SD 储量算法[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [7] 曹代勇, 李青元, 朱小弟, 等. 地质构造三维可视化模型探讨[J]. 地质与勘探, 2001, 37(4): 60-62.
CAO Daiyong, LI Qingyuan, ZHU Xiaodi, et al. Study on the 3D visual model of geological structure[J]. Geology and Prospecting, 2001, 37(4): 60-62.
- [8] Wu Q, Xu H, Zou X K. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration[J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(1): 35-43.
- [9] 戴碧波, 王李管, 贾明涛, 等. 三维数字建模技术在某铜矿山中的应用[J]. 地质与勘探, 2007, 43(3): 97-101.
DAI Bibo, WANG Liguan, JIA Mingtao, et al. Application of 3D digital modeling in a copper mine[J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(3): 97-101.
- [10] Wöhler C. 3D Computer Vision Efficient Methods and Applications [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [11] Lee J, Zlatanova S. 3D Geo-Information Sciences[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [12] 吴冲龙. 计算机技术与地矿工作信息化[J]. 地学前缘, 1998, 1(4): 343-355.
WU Chonglong. Computing technology in the field of mineral resource [J]. Earth Science Frontiers, 1998, 1(4): 343-355.
- [13] 吴冲龙, 刘刚, 田宜平, 等. 地矿勘查工作信息化的理论与方法问题[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2005, 30(3): 359-365.
WU Chonglong, LIU Gang, TIAN Yiping, et al. Theory and method problems of information of geological surveying and mineral resource exploration [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2005, 30(3): 359-365.
- [14] 吴立新, 殷作如, 邓智毅, 等. 论 21 世纪的矿山: 数字矿山[J]. 煤炭学报, 2000, 25(4): 337-342.
WU Lixin, YIN Zuoru, DENG Zhiyi, et al. Research to the mine in the 21st century: digital mine [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(4): 337-342.
- [15] 吴立新, 殷作如, 钟亚平. 再论数字矿山: 特征、框架与关键技术[J]. 煤炭学报, 2003, 28(1): 1-6.
WU Lixin, YIN Zuoru, ZHONG Yaping. Restudy on digital mine: characteristics, framework and key technologies[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(1): 1-6.
- [16] 吴立新. 数字矿山技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2009.
- [17] 张夏林, 吴冲龙, 翁正平, 等. 数字矿山软件 (QuantyMine) 若干关键技术的研发和应用[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2010, 35(2): 302-310.
ZHANG Xialin, WU Chonglong, WENG Zhengping, et al. Research and application of the digital mine software QuantyMine [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(2): 302-310.

(编辑 郑洁)