

基于 Micromine 的海山富钴结壳矿床三维评价模型应用

刘永刚^{1,2}, 杨永^{1,2}, 何高文^{1,2}, 杨胜雄^{1,2}

LIU Yonggang^{1,2}, YANG Yong^{1,2}, HE Gaowen^{1,2}, YANG Shengxiong^{1,2}

1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458;

2. 自然资源部海底矿产资源重点实验室/广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075

1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, Guangdong, China;

2. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, MNR/Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, Guangdong, China

摘要:富钴结壳是一种附着于海山表面生长的层状矿床。与二维空间展布的多金属结核矿床不同,富钴结壳的分布很大程度上依赖于海山平台边缘和斜坡的形态及微地貌特征,可将其视为一种特殊的三维表层矿床。传统的二维矿床评价模式不能真实直观地反映海山结壳资源的空间分布特征,利用 Micromine 成熟的数据库技术、矿床三维建模技术和 GIS 空间分析手段,全面立体地表达和展示海山结壳矿床的资源形态及其空间分布,采用距离反比加权法和封闭多面体法对资源量估算结果进行比较验证。该结壳矿床三维评价模型的应用符合当前三维数字矿床的成矿预测和储量评估的发展趋势,同时也为中国富钴结壳资源勘查与区域优选和放弃提供技术支持。

关键词:富钴结壳; Micromine; 三维建模

中图分类号: P618.62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)02/03-0385-07

Liu Y G, Yang Y, He G W, Yang S X. Application of the Micromine-based 3D evaluation modeling of seamount cobalt-rich crustation deposits. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(2/3): 385-391

Abstract: Cobalt-rich crustation deposit is a stratiform one growing on the surface of seamount. It differs from the polymetallic nodules distributed in two-dimensional space in that its distribution is largely dependent on the morphology and micro-geomorphology of the edge and slope of seamount platform, so it can be regarded as a special three-dimensional surface deposit. The traditional two dimensional estimation modeling cannot truly and intuitively reflect the spatial distribution characteristics of seamount crustation deposit. However, the mature database technology of Micromine, 3D modeling technology of deposit and GIS spatial analysis method can be used to comprehensively display its three-dimensional morphology and spatial distribution, and the inverse distance weighting method and closed polyhedron method can be used to verify its resource quantity. The application of the 3D evaluation modeling of crustation deposits conforms to the current development trend of metallogenic prediction and reserve evaluation of 3D digital deposits, and also provides technical support for the exploration and regional target optimization of cobalt-rich crustation resources in China.

Key words: cobalt-rich crustation; Micromine; three dimensional modeling

随着计算机仿真和可视化技术的进一步发展,矿床三维可视化建模技术日趋成熟,基于三维数字

矿床的成矿预测和资源量评估逐渐成为研究的热点^[1-14]。基于三维可视化技术的 Micromine、Surpac、

收稿日期: 2020-05-06; **修订日期:** 2020-12-30

资助项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(编号: GML2019ZD0106)、“十三五”大洋专项(编号: DY135-C1-1-01、DY135-C1-1-02、DY135-C1-1-07)和中国地质调查局项目(编号: DD20190629)

作者简介: 刘永刚(1980-),男,博士,高级工程师,从事大洋矿产资源调查和评价研究。E-mail: llt_2002@163.com

通信作者: 何高文(1968-),男,博士,教授级高级工程师,从事海洋地质方面的研究。E-mail: hegaowen@163.com

Datamine 等被国际矿业界广泛应用的软件为矿山企业的三维矿床勘探与建模、资源精确化评价、矿山项目多方案对比研究等生产技术管理和项目决策提供了快捷、强大的工具和智能支持。澳大利亚 Micromine 国际矿业软件有限公司开发的 Kantan 3D 矿产资源储量计算功能于 2003 年得到原国土资源部矿产资源储量司的技术认定,采用该软件模块评估资源具有评估机构认可的资质,此后涌现出一大批以该软件为应用平台的陆地矿床建模和评估的研究成果^[15-29]。

海山结壳富含 Co、Ni、Cu、Pb 等金属元素,以及稀土元素(REE)和铂族元素(PGE),因其潜在的经济价值成为当前国际海域激烈竞争和角逐的深海矿产资源之一。中国从 20 世纪 80 年代至今,长期从事海山结壳资源调查和评价工作,在空间分布规律、评价方法、资源量估算等方面取得了丰富的研究成果^[30-47]。然而,先前的评价研究是基于传统的二维工作模式,存在信息损失、表达片面、立体性差等不足。随着研究的深入,如何从空间上全面真实地反映海山结壳矿床的资源形态及其空间分布越发引起科学研究人员的思考和探索。

本文将 Micromine 软件的 Kantan 3D 模块应用于海山结壳资源评价工作,利用现有的水深和地形资料,结合海山结壳空间分布特征,构建结壳矿床的三维实体模型和块体模型,运用软件提供的距离反比加权法和封闭多面体法对结壳资源量进行估算,以检验 Micromine 软件在海山结壳三维矿床模型构建和资源量估算中的可靠性和准确性。

1 资料和方法

研究区位于西太平洋某海山区,收集的全部资料来自大洋航次调查。其中,样品资料共 28 个地质采样站位,记录了地理位置、采样水深、结壳厚度、湿密度、含水率、金属品位等信息;海山地形资料来自航次调查全覆盖多波束数据,其测量设备是挪威 Kongsberg 公司生产的 EM122 多波束系统,该系统获取的数据可靠、精度较高,能保证海底地形的真实性。

此次收集的测站分布于水深 1400~2800 m 的海山斜坡上,由海山平顶边缘沿斜坡向坡底方向展布。由于采样获取的结壳常为板状、砾状、钴结核 3 种类型共存,因此选择其中具有代表性的结壳类型

厚度作为该测站的矿样厚度。本文采用的测站结壳厚度计算方法为:结壳样品有板状结壳时采用板状结壳的厚度;没有板状结壳而有砾状结壳时,采用砾状结壳厚度;只有钴结核时采用钴结核的厚度,即各结壳类型厚度不进行累加,只取一种类型的结壳厚度作为测站的矿样厚度。

地形资料显示,研究区所在海山属于大型平顶海山(图 1)。该研究区在空间上沿 NE—SW 向延伸,长约 23 km,宽约 12 km,水深范围 1300~4500 m。地形起伏变化大致分为两级平台:从 1300~1450 m 地形平坦,地势变化缓和,平均坡度不超过 5°,从 1450~1700 m 出现明显的坡降,坡度变化范围为 7°~30°;从 1700~1800 m 地形又趋于平缓,坡度最大不超过 7°;从 1800~4500 m 地势变陡,局部坡度可达 60°。结壳测站大都分布于海山缓坡之上。

2 三维模型的建立

本次模型建立选用 Micromine 14.0 软件作为工作平台。Kantan 3D 作为该软件中三维建模和储量估算模块,能够实现各种工程和矿床的三维立体显示和成图,并提供进行矿体品位插值和储量估算的各种方法。海山结壳三维建模及资源量估算工作流程如图 2 所示。

2.1 地质数据库的建立

地质数据库是可视化矿床模型中最重要的内容之一,是进行地质解译、品位估计、储量计算等工作的重要基础。在进行三维矿体建模时, Micromine 软件要求提供地质采样测站名称、位置、样长、样品分析数据等基本信息。为此,需要准备测站文件和样品分析文件,其文件数据结构如表 1 所示。测站文件中的水平坐标采用 WGS84/World Mercator 坐标系统下的平面直角坐标。垂直方向上的矿体厚度和样长同水平方向长度相比,二者在相同量纲(单位均为 m)情况下数量级相差 10^4 。为减少建模时带来的不便,在生成数据文件时将矿体厚度和样长都放大 10^4 倍,样品分析文件中对应的区间值也做相应的转化,保证计算过程中数量级一致。

2.2 水深地形模型的建立

在目前海山结壳资源评价研究中,水深和地形是矿区圈定考虑的主要因素之一。水深反映了结壳在空间上的大致分布范围,地形特征的空间变化

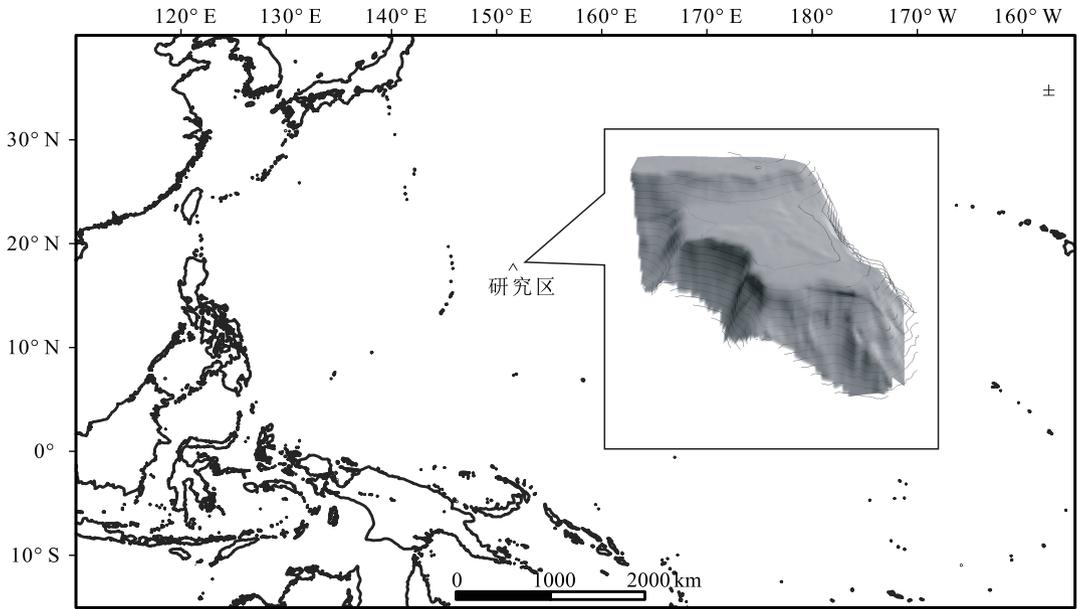


图 1 研究区地理位置及三维地形示意图

Fig. 1 The location of the study area and the 3D terrain map

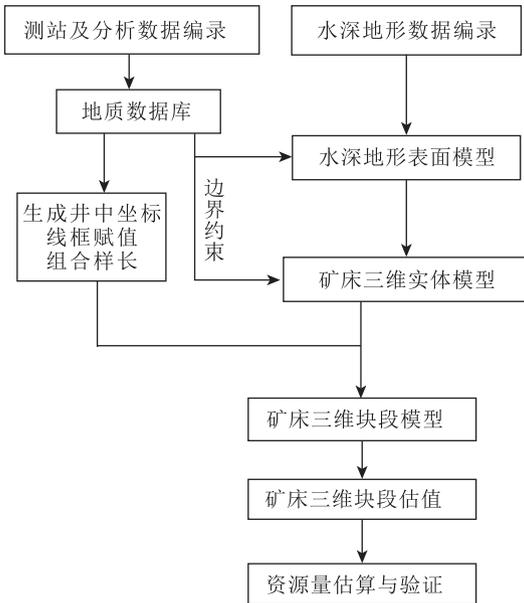


图 2 海山结壳三维建模及资源量估算工作流程

Fig. 2 Workflow of 3D modeling and resource estimation of seamount crustation deposit

造成结壳矿床空间分布的不连续性。

本文收集的结壳测站分布于海山斜坡上,28 个有效测站采样记录显示,测站结壳分布的水深范围为 1400~2800 m。在无摄像、浅剖等资料参考的情

表 1 地质数据库文件数据结构

Table 1 Data frame of geological database

文件名称	字段名称	数据类型 *	字符宽度 <256	小数位数	计量单位
测站文件	测站名称	字符型	7	-	-
	经度	数值型	-	2	m
	纬度	数值型	-	2	m
	高程	数值型	-	2	m
	矿体厚度	数值型	-	2	m
样品分析文件	样长	数值型	-	2	m
	测站名称	字符型	7	-	-
	顶深	数值型	-	2	m
	底深	数值型	-	2	m
	湿密度	数值型	-	2	g/cm ³
	元素含量	数值型	-	2	%

况下,考虑将结壳分布的水深上边界和下边界初步定为 1400 m 和 2800 m^[46]。

研究认为,结壳通常在海山平顶周边呈环状分布特征,高品质结壳在海山主要呈现为“隆起带效应”、“窄脊效应”和“坡折区效应”等富集模式^[33]。此次运用 ESRI 公司基于 ArcGIS 平台开发的海底地形模型(Benthic Terrain Modeler,简称 BTM)对海山地貌进行分类。该软件模型基于邻域统计方法,

能够提取窗口内各种尺度的地形特征,如测深定位指标(Bathymetric position index,简称BPI)、坡度、粗糙度等,将各种特征进行叠加分析,对海底地貌进行分类^[48-49]。本次将海山研究区地貌共分为10类,即窄谷、平坦区洼地、斜坡区的谷、脊上洼地、大谷地、顶部平坦区、斜坡、平坦区的脊、窄脊、陡坡。其中,窄脊地貌中分布的结壳测站占全部测站的73%,是最有利于结壳分布的地貌类型(图3)。该结果与前文“窄脊效应富集结壳”的研究认识基本吻合。

研究表明,坡度较大区域板状结壳出现率较高,但 7° 以下的平坦区和平缓区也是结壳富集和成矿的有利区域^[36]。根据本次统计结果,研究区结壳赋存的坡度范围较宽泛,从平缓区至 30° 的斜坡区均有分布,以板状类型为主的结壳主要分布于 $2^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 的区域。因此,将结壳分布的有利坡度区间定为 $2^{\circ}\sim 25^{\circ}$ (图4)。

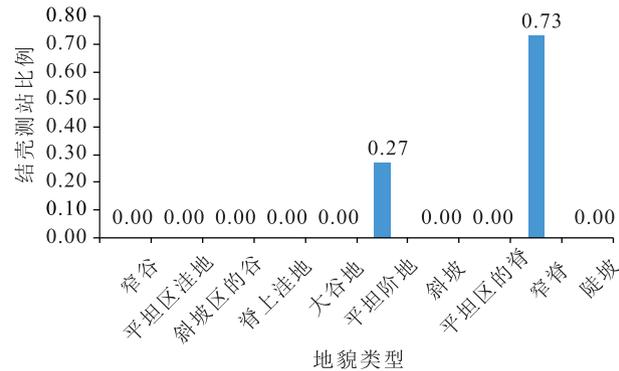


图3 地貌类型与结壳测站比例关系

Fig. 3 The relationship between geomorphology and stations ratio of crustation

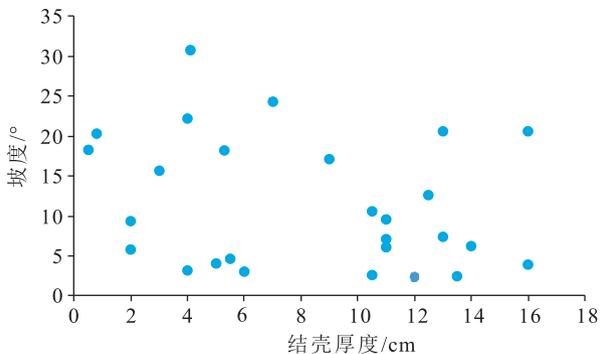


图4 结壳厚度与坡度散点关系

Fig. 4 The relationship between thickness and gradient of crustation

2.3 矿床三维实体模型建立

在构建矿床三维实体模型时,首先计算得到全部测站的顶端和底端的三维坐标,以1400 m和2800 m的水深线作为结壳分布的上界和下界,将全部测站的顶端坐标和底端坐标分别连接生成顶表面和底表面,并封闭生成线框实体。之后,利用窄脊地貌和有利坡度区间,对线框实体进行约束和裁切,最终生成矿床三维实体模型(图5)。

2.4 矿床三维块体模型建立

为了合理有效地估算整个矿床的品位,需要对矿床实体模型进行约束来建立矿床块体模型(图6)。该建模方法的实质是:在整个建模范围内,把矿床实体划分成一系列的立方块单元,矿体主体由尺寸相同的立方块单元组成,而在矿体边界位置则通过细分立方块单元建立子块段,从而保证更加逼近详细的地质要求。由此,所有立方块单元的属性变化规律可以反映整个矿体的特征变化规律。通过模型中已知的立方块单元品位,用距离反比加权法对其进行空间插值,直到每一个单元块模型都有品位值。

块体划分一般按工程间距的 $1/5$ 进行设置。研究区平均工程间距2 km,因此单元块模型确立为 $400\text{ m}\times 400\text{ m}\times 400\text{ m}$,次分块设置为 $200\text{ m}\times 200\text{ m}\times 200\text{ m}$,共有1509个单元块。



图5 海山结壳三维实体模型

Fig. 5 3D entity model of seamount crustation deposit

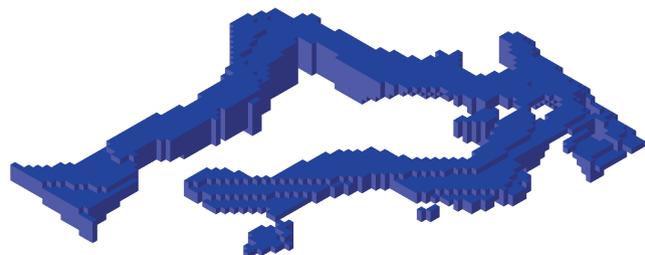


图6 海山结壳三维块体模型

Fig. 6 3D cubic model of seamount crustation deposit

2.5 样品组合

地质数据库中的数据是块体模型内所有单元块各种参数估值及资源量估算的依据。为确保得到的参数估计值无偏,所有样品数据应落在相同的承载上,因此需要对已有样品数据进行重新组合。

这里采用按钻孔组合方法,将已知样品长度转化为同一长度,避免进行空间插值时样品长度不一致导致分配的权值差别较大。参照中国标准出版社出版发行的《大洋富钴结壳资源勘查规范》(GB/T 35572—2017),目前富钴结壳圈矿厚度不小于 4 cm,结合考虑原始样品长度和单元块尺寸,将全部样品按 4 cm 的单元分割,对应数据库中单元样长的长度为 400 m。

3 资源量估算

3.1 资源量估算方法

Micromine 软件提供了多种资源量估算的方法。本文考虑到研究区分布的测站数量较少,勘探密度不够大,选择距离反比加权法进行空间品位插值。为便于进行结果比较,引入了封闭多面体法进行资源量估算。

(1) 距离反比加权法(IDW)

距离反比加权法综合了泰森多边形邻近点法和多元回归渐变法的优点,假设待估值为局部邻域内所有数据点的距离反比加权平均值。对于海山结壳三维矿体,根据其品位的空间变化,利用距离幂的倒数作为样品估值参考的权重,对待估的单元块进行品位估值。计算公式为:

$$X_d = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{d_i^m} \Bigg| \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^m} \quad (1)$$

式中, X_d 为待估单元块的值; X_i 为第 i 个样品的值; d_i 为第 i 个样品到待估单元块中心的距离。距离待估单元块越近的样品,其品位对待估单元块的影响就越大,因而距离待估单元块近的样品的权值比

距离待估单元块远的样品的权值大。本文对幂次 m 取值为 2。

研究区内资源量计算公式如下:

$$Q = \rho \times V \times n \times (1-W) \times C \quad (2)$$

式中, Q 为研究区干结壳资源量; ρ 为湿结壳密度; V 为矿体单元块的体积; n 为单元块的数量; W 为研究区结壳含水率(本次取 30%); C 为研究区金属平均含量。

(2) 封闭多面体法

该算法根据圈定的三维实体模型(三角面网)的体积,对矿体资源量进行估算。首先将模型三角面网中最低海拔标高值作为基准平面,计算其与每个三角面之间的体积;根据三角面方向,如果计算的体积位于模型之内,就将其加到总体积中,反之,就从总体积中减掉。然后对模型内的所有样品采用简单平均或系数加权的方法得到总品位和体重。最后,用模型体积与体重乘积得到资源量,再与品位相乘得到金属量。计算公式如下:

$$Q_1 = \rho \times V \quad (3)$$

$$Q_2 = Q_1 \times (1-W) \quad (4)$$

$$P = Q_2 \times C \quad (5)$$

式中, Q_1 为研究区湿结壳资源量; Q_2 为研究区干结壳资源量; P 为研究区金属资源量; ρ 为湿结壳体重; V 为矿体体积; W 为研究区结壳含水率(本次取 30%); C 为研究区金属平均含量。

3.2 资源量估算与验证

将距离反比加权法和封闭多面体法 2 种算法的估算结果分别除以距离反比加权法的计算结果得到各指标的比值,并进行比较(表 2)。结果显示,封闭多面体法和距离反比加权法在矿体体积、资源量、金属量方面,除金属铜差异较大外,计算得到的结果十分接近,说明研究区基于 Micromine 软件运用距离反比加权方法对结壳三维矿体进行资源量估算,方法合理,相对差异小,结果可靠。

表 2 富钴结壳资源估算结果对比

Table 2 Estimation results comparison of cobalt-rich crustation resources

方法	体积	湿吨位	干吨位	锰金属	钴金属	镍金属	铜金属	钴当量
距离反比加权法(IDW)	1	1	1	1	1	1	1	1
封闭多面体	0.98	0.99	0.99	1.00	0.96	0.98	0.74	0.99
差异率	1.69%	1.32%	1.32%	0.39%	3.52%	1.50%	26.32%	0.85%

4 结 论

(1) 将 Micromine Kantan 3D 三维勘探与资源量计算软件应用于海山结壳资源评价工作,使原始资料数据库和三维矿床模型有机地结合在一起,不但便于直观全面地了解矿区不同空间位置上的矿体形态和空间分布特征,以及相互之间的空间位置关系等诸多信息,而且可以基于三维模型进行品位和资源量的估算,为将来的勘探规划提出可靠的建议。

(2) 海山结壳空间分布受水深、地貌和坡度多种因素的影响。结壳主要分布于 1400~2800 m 水深范围,窄脊地貌类型最有利于富钴结壳的生长发育,坡度的有利分布范围为 $2^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 。

(3) 采用 Micromine Kantan 3D 软件圈划结壳矿体具有较好的可操作性和实用性,圈定的矿体比二维模式更加直观、准确,而且具有较高的可靠性。资源量估算结果表明,用 Micromine Kantan 3D 软件提供的距离加权反比法进行海山结壳资源量估算,方法合理,相对误差较小,结果真实可靠。

(4) 海山结壳三维实体模型和三维块体模型的构建,真实全面地反映了结壳矿体的空间形态和数字特征,实现了三维模式下结壳矿体的形态描述和数字分析,推动海山结壳资源评价由传统二维模式向三维模式突破迈出了尝试性的一步。

参考文献

[1] Apel M. From 3D geomodelling systems towards 3D geoscience information systems: Data model, query functionality, and data management[J]. Computers & Geosciences, 2006, 32: 222-229.

[2] Kaufmann O, Martin T. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines[J]. Computers & Geosciences, 2008, 34: 278-290.

[3] Wang G, Zhang S, Yan C, et al. Mineral potential targeting and resource assessment based on 3D geological modeling in Luanchuan region, China[J]. Computers & Geosciences, 2011, 37: 1976-1988.

[4] Wang G, Zhu Y, Zhang S, et al. 3D geological modeling based on gravitational and magnetic data inversion in the Luanchuan ore region, Henan Province, China[J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 80: 1-11.

[5] Wang G, Pang Z, Boisvert B J, et al. Quantitative assessment of mineral resources by combining geostatistics and fractal methods in the Tongshan porphyry Cu deposit (China) [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 134: 85-98.

[6] Wang G, Li R, Carranza J M, et al. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China[J].

Ore Geology Reviews, 2015, 71: 592-610.

[7] 黄文斌, 肖克炎, 陈学工, 等. 矿产勘查储量估算三维可视化原型系统的开发[J]. 矿床地质, 2006, 25(2): 207-212.

[8] 江少卿, 李丽, 冯瑞, 等. 西藏多龙矿集区铁格隆矿田荣那和拿若矿床蚀变矿化特征与三维勘查模型[J]. 矿床地质, 2015, 34(2): 209-224.

[9] 毛先成, 邹艳红, 陈进, 等. 危机矿山深部、边部隐伏矿体的三维可视化预测——以安徽铜陵凤凰山矿田为例[J]. 地质通报, 2010, 29(2/3): 401-413.

[10] 毛先成, 唐艳华, 邓浩. 地质体的三维形态分析方法与应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(2): 588-595.

[11] 毛先成, 赵莹, 唐艳华, 等. 基于 TIN 的地质界面三维形态分析方法与应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1493-1499.

[12] 袁峰, 李晓晖, 张明明, 等. 隐伏矿体三维综合信息成矿预测方法[J]. 地质学报, 2014, 88(4): 630-643.

[13] 王功文, 郭远生, 杜杨松, 等. 基于 GIS 的云南普朗斑岩铜矿床三维成矿预测[J]. 矿床地质, 2007, 26(6): 651-658.

[14] 王功文, 张寿庭, 燕长海, 等. 基于地质与重磁数据集成的柴川钨多金属矿区三维地质建模[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2011, 36(2): 360-366.

[15] Chen J, Shi R, Chen Z, et al. 3D Positional and Quantitative Prediction of the Xiaoqinling Gold Ore Belt in Tongguan, Shaanxi, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(3): 653-660.

[16] 陈爱兵, 秦德先, 张学书, 等. 基于 MICROMINE 矿床三维立体模型的应用[J]. 地质与勘探, 2004, 40(5): 77-80.

[17] 陈建平, 吕鹏, 吴文, 等. 基于三维可视化技术的隐伏矿体预测[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 54-62.

[18] 陈建平, 陈勇, 朱鹏飞, 等. 数字矿床模型及其应用——以新疆阿勒泰地区可可托海 3 号伟晶岩脉稀有金属隐伏矿预测为例[J]. 地质通报, 2011, 30(5): 630-641.

[19] 胡青. 云南个旧东区大白岩勘查区大比例尺隐伏矿体三维成矿预测[D]. 中国地质大学硕士学位论文, 2008.

[20] 卢大超, 付友山. 三维矿产资源评价软件 MICROMINE 在金属矿山资源储量估算中的应用——以吉林舒兰季德钼矿为例[J]. 世界地质, 2010, 29(3): 450-458.

[21] 黎枫估. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿三维模型构建和资源量估算——基于 MICROMINE 的应用[D]. 成都理工大学硕士学位论文, 2010.

[22] 梁涛, 陆树文, 罗照华, 等. 安妥岭钼矿矿体线框模型和矿块模型的初步建立[J]. 地质与勘探, 2010, 46(3): 553-560.

[23] 史蕊, 陈建平, 陈珍平, 等. 陕西小秦岭金矿带潼关段区域三维定量预测[J]. 地质通报, 2011, 30(5): 711-721.

[24] 汪德文. MicroMine 软件在矿山开发研究平台建设中的应用[D]. 中南大学硕士学位论文, 2008.

[25] 王丽梅, 陈建平, 唐菊兴. 基于数字矿床模型的西藏玉龙斑岩型铜矿三维定位定量预测[J]. 地质通报, 2010, 29(4): 565-570.

[26] 朱海滨. 基于 Micromine 软件的固体矿产资源量估算原理与方法[J]. 地质找矿论丛, 2013, 28(1): 106-110.

[27] 曾福基, 陈苏龙, 李德彪, 等. Micromine kantan3D 在瓦勒根金矿资源储量计算工作中的应用[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2010, 28(4): 68-75.

- [28] 张思科. 基于 Micromine 的三维矿体建模及资源储量估算的研究[D]. 中国地质大学硕士学位论文, 2010.
- [29] 郑文宝, 黎枫信, 唐菊兴, 等. 基于 Micromine 软件下地质统计学在甲玛矽卡岩型铜多金属矿储量计算中的应用[J]. 地质与勘探, 2011, 47(4): 726-736.
- [30] He G, Ma W, Song C, et al. Distribution characteristics of seamount cobalt-rich ferromanganese crusts and the determination of the size of areas for exploration and exploitation[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 30(3): 63-75.
- [31] Wu Z Y, Chu F Y, Ma W L, et al. Resources calculation of cobalt-rich crusts with the grid subdivision and integral method[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 26(5): 43-53.
- [32] 程永寿, 冯志勇, 殷汝广, 等. 基于 GIS 的富钴结壳资源量计算系统开发[J]. 海洋通报, 2007, 26(6): 85-90.
- [33] 程永寿, 姜效典, 张富元, 等. 西太平洋拉蒙特平顶海山富钴结壳矿区圈定与资源量估算[J]. 海洋学报, 2015, 37(1): 106-114.
- [34] 何高文, 梁东红, 宋成兵, 等. 浅地层剖面测量和海底摄像联合应用确定平顶海山富钴结壳分布界线[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2005, 30(4): 509-512.
- [35] 马维林, 初凤友, 金翔龙. 富钴结壳资源评价和圈矿方法探讨[J]. 海洋学报, 2007, 29(2): 67-73.
- [36] 马维林, 杨克红, 包更胜, 等. 中太平洋海山富钴结壳成矿的空间分布规律研究[J]. 海洋学报, 2014, 36(7): 77-89.
- [37] 武广海, 周怀阳, 杨树锋. 最近区域法与地质块段法在富钴结壳资源量评估中的综合应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(4): 87-92.
- [38] 武光海, 马维林, 刘捷红, 等. 海山富钴结壳的圈矿方法[J]. 海洋学研究, 2005, 23(4): 15-19.
- [39] 吴自银, 初凤友, 马维林, 等. 网格剖分积分法计算富钴结壳资源量[J]. 海洋学报, 2007, 29(5): 81-87.
- [40] 杨克红, 初凤友, 马维林, 等. 富钴结壳多维数据模型及矿区圈定研究[J]. 海洋学报, 2007, 29(6): 58-63.
- [41] 杨克红, 马维林, 章伟艳, 等. 富钴结壳申请区块优选的模糊评判方法[J]. 海洋学报, 2010, 32(6): 152-156.
- [42] 张富元, 章伟艳, 朱克超, 等. 钴结壳矿区圈定和资源评价的参数指标[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2008, 33(2): 251-258.
- [43] 张富元, 章伟艳, 朱克超, 等. 太平洋海山钴结壳资源量估算[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2011, 36(1): 1-11.
- [44] 张富元, 章伟艳, 任向文, 等. 全球三大洋海山钴结壳资源量估算[J]. 海洋学报, 2015, 37(1): 88-105.
- [45] 章伟艳, 张富元, 程永寿, 等. 大洋钴结壳资源评价的基本方法[J]. 海洋通报, 2010, 29(3): 342-350.
- [46] Zhang F, Zhang W, Zhu K, et al. Distribution Characteristics of Cobalt-rich Ferromanganese Crust Resources on Submarine Seamounts in the Western Pacific[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(4): 796-803.
- [47] 赵斌, 吕文超, 张向宇, 等. 西太平洋维嘉平顶山沉积特征及富钴结壳资源意义[J]. 地质通报, 2020, 39(1): 18-26.
- [48] Lundblad E R, Wright D J. Classifying Benthic Terrains with Multibeam Bathymetry, Bathymetric Position and Rugosity: Tutuila, American Samoa[J]. *Marine Geodesy*, 2005, 28: 1-26.
- [49] Lundblad E R, Wright D J, Miller J, et al. A Benthic Terrain Classification Scheme for American Samoa[J]. *Marine Geodesy*, 2006, 29: 89-111.