

李维禄,高思宇,杨锦坤,等. 面向多金属结核资源评价的大数据挖掘与融合. 吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(1): 340-350. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230166.

Li Weilu, Gao Siyu, Yang Jinkun, et al. Big Data Mining and Fusion Towards Resources Evaluation of Polymetallic Nodules. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55 (1): 340-350. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230166.

面向多金属结核资源评价的大数据挖掘与融合

李维禄, 高思宇, 杨锦坤, 韩春花, 韦广昊, 孔 敏

国家海洋信息中心, 天津 300171

摘要:深海多金属结核资源的预测评价已走向数据科学范式,急需开展深层次找矿-示矿大数据挖掘与融合。通过分析讨论深海矿产资源评价的研究进展,以及大数据分析在矿产资源评价领域的应用,探索了面向多金属结核资源评价的大数据挖掘与融合技术方法,提出了多金属结核资源地质模型知识谱系分析、多源异构资源-环境数据特征信息挖掘、基于大数据空间决策分析的融合集成,以及多金属结核资源评价对比验证等关键技术流程。大数据挖掘与融合技术方法创新性分析常规/非常规资源评价数据及其与矿床的相关关系,构建符合地质约束的大数据空间决策支持推理模型,实现多源异构资源评价信息的特征提取和融合集成,为深海矿产资源评价提供了基于大数据分析的技术解决途径。大数据挖掘与融合技术研究可提高深海矿产资源评价的精度和效率,对深海资源-环境等数据的高效利用、新多金属结核矿区的勘探评价以及其他深海矿种的预测评价具有重要的理论价值和实践意义。

关键词:多金属结核;资源评价;深海矿产;大数据;数据挖掘;数据融合

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230166

中图分类号:P744.3

文献标志码:A

Big Data Mining and Fusion Towards Resources Evaluation of Polymetallic Nodules

Li Weilu, Gao Siyu, Yang Jinkun, Han Chunhua, Wei Guanghao, Kong Min

National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China

Abstract: The prediction and evaluation of deep-sea polymetallic nodules have entered into the data science paradigm, and the deep mining and fusion of big data for ore prospecting and ore indication are seriously needed. Through analyzing the research progress of deep-sea polymetallic nodules evaluation, and discussing the application of big data approaches in mineral resources evaluation, the big data mining

收稿日期:2023-07-12

作者简介:李维禄(1987—),男,副研究员,主要从事海洋矿产资源评价、海洋大数据应用等相关方面的研究, E-mail: qrangle@163.com, liweilu@nmdis.org.cn

通信作者:杨锦坤(1980—),男,正高级工程师,主要从事海洋大数据应用相关方面的研究, E-mail: yangjinkun@nmdis.org.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42206226);国家重点研发计划项目(2022YFC2806601)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (42206226) and the National Key R&D Program of China (2022YFC2806601)

and fusion techniques towards resources evaluation of polymetallic nodules are explored, in which, the major research contents and methods like the knowledge pedigree analysis for polymetallic nodules resources, the metallogenic characteristics mining methods based on data science, the fusion and integration methods based on spatial decision-making model with big data, the comparison and verification of quantitative prediction and evaluation on polymetallic nodules resource, are proposed. It creatively analyzes conventional/unconventional resources evaluating data and its correlation with ore deposits, and establishes the spatial decision-making model with geological constraint and big data. On this basis, feature extraction and fusion of the information from multi-source heterogeneous data are achieved to supply the technology solution based on big data for deep-sea mineral resources evaluation. The research on big data mining and fusion techniques could improve the accuracy and efficiency of polymetallic nodules resources evaluating, and has important theoretical value and practical significance to the efficient use of deep-sea resource-environmental data, the exploration and evaluation of new polymetallic nodules mining area, and the prediction and evaluation of other deep-sea minerals.

Key words: polymetallic nodules; resources evaluation; deep-sea minerals; big data; data mining; data fusion

0 引言

深海多金属结核因其富含铜、钴、镍、锰、稀土和铂族等关键金属元素,是一种具有潜在经济价值的战略性矿产资源,其空间分布规律和资源潜力评价一直是海洋地球科学研究中的热门话题^[1-4],对于维护国际海底资源开发权益、满足经济发展和安全需求具有重要意义。我国自20世纪70年代开始针对多金属结核资源的调查和开发进行研究,取得了重要进展^[5-7],并先后在国际海底区域申请到3块多金属结核勘探合同区(位于东太平洋 Clarion-Clipperton 区(CC区)的中国大洋矿产资源研究开发协会合同区和中国五矿集团有限公司合同区、位于西太平洋的北京先驱高技术开发公司合同区),随着区域性调查工作的开展和新矿区的获批,对多金属结核资源的预测评价有着强烈的现实需求。

长期以来,深海多金属结核资源评价基本遵循陆地矿产资源评价的基本理论和方法,同时,受自身特殊性的影响,存在数据获取难度大、样本分布不均等现实差异,传统的基于多元统计分析、地质统计学等的资源评价方法对整体空间相关性考虑不够,难以刻画复杂的非线性空间关联规律。随着多来源、多类型、多时段以及多尺度特征常规/非常规资源评价数据的不断汇集,深海矿产资源预测评价进入了大数据时代^[8],研究难点逐渐聚焦于深层次找矿-示矿信息挖掘与集成。伴随机器学习和深度学习等大数据分析方法的迅猛发展,且在处理矿产资源时空

大数据中表现出极强的分类和预测性能,深海矿产资源预测评价逐步从传统的知识驱动、数据驱动向基于数据科学的模型混合驱动转变^[9],如何基于大数据分析方法和支撑评价特征提取与信息融合集成成为提高深海矿产资源预测评价成效的关键。结合以上现实,有必要聚焦研究程度较高的多金属结核资源开展大数据挖掘与融合技术探索,一方面对提升深海矿产资源-环境数据的高效利用和深海矿产资源评价的精细化表征水平具有重要意义,另一方面可以满足新矿区的勘探评价需求,为其他海底资源的勘查和预测评价提供方法支撑和依据。

1 深海矿产资源评价研究进展

矿产资源预测评价是对地球表面具有经济价值的矿产可能存在的位置和资源潜力进行科学预测,指导国家政府资源政策制定和矿产勘探部署^[10-12]。从全球来看,矿产资源评价方法的发展大致可划分为地质类比、多元统计、3S体系(地质模型系统、决策支撑系统、地理信息系统)三个阶段,并进一步向非线性和复杂性理论及模型方面发展^[13]。

20世纪60年代以来,国际上对深海矿产资源开展了大规模的调查研究,多金属结核资源评价成为矿产资源评价的新领域^[14-16]。受资源安全以及自身独特性和开发难度的限制,海洋矿产资源评价方法和理论缺少像陆地矿产资源一样完善和广泛的国际交流^[17-19],目前暂未开展大规模开采,多金属结核资源评价理论和方法也处在由简单到复杂、由

单因素到多因素、从传统统计学和地质统计学向数据科学的探索应用发展之中^[20]。

我国是多金属结核先驱投资者之一,勘查成果和研究水平在国际大洋矿产资源领域具有广泛影响。我国学者借鉴陆地矿产资源评价基本概念、理论和方法开展深海矿产资源评价研究。最早应用基础数学方法开展大洋多金属结核资源评价与矿区圈定^[21],基于多变量精确分类需求,利用各种定量的数学地质方法,如因子分析、聚类分析、趋势面分析等多元统计分析进行了大量的实践和研究^[22-23]。在此基础上,为进一步解决地质变量的随机性和结构性问题,以区域化变量为核心的地质统计学方法在矿产资源评价中广泛应用,例如将协同克里格方法以及协同区域化理论应用于 CC 区我国西开辟区的多金属结核地质模型建立工作等^[24]。但地质统计学方法只能度量二阶平稳或本征假设条件下的相关性,难以表征和模拟复杂空间结构和重构复杂空间形态^[25]。在此背景下,以分形理论和神经网络分析等方法为代表的非线性方法逐渐被应用到该领域中^[26-27]。

与此同时,结合矿床模型在陆地矿产中的应用发展以及各类数据的不断增长,国际海底管理局(2010)发布 CC 区多金属结核资源沉积地质模型技术研究报告^[18],为勘探者、合同承包者以及领域专家等提供指导与参考;国内学者构建了东北太平洋多金属结核矿床地质模型^[2],采用证据权法、逻辑斯蒂回归、模糊逻辑、人工神经网络等空间决策方法,对 CC 区多金属结核资源分布进行了定量预测研究,创新性发挥了多学科交叉的优势,大数据预测思维下的深海矿产资源评价方法逐渐发展。

其他矿种方面,早期评价方法主要聚焦于成矿背景和分布规律等先验知识,基于这些方法的矿区圈定和资源评价途径以及矿区圈定参数指标逐渐被提出^[28-30]。在此基础上,利用多源数据关联关系综合评价海底富钴结壳资源的方法逐渐发展,如利用多波束背向散射回波强度确定其与不同丰度多金属结核、富钴结壳以及深海沉积之间的定性和定量关系^[31-32];利用坡度-距离等多点地质统计学方法定量评价海山富钴结壳资源^[33-34]。近年来,国内学者逐步探索应用大数据分析方法,系统建立了海底多金属硫化物资源定量评价预测方法体系,并成功运用到大西洋和印度洋多金属硫化物的成矿预测研究中^[35];以及应用知识驱动和数据驱动的组合预测方

法和深度学习算法,解决已知硫化物矿床(点)不足、小样本、数据缺失、数据耦合、主客观误差等问题,提高了预测准确性和效率^[36]。

总体上,深海矿产资源预测评价已经从定性走向了定量,从数据稀疏型走向了数据密集型,高维度、高计算复杂度及高不确定性等难题逐渐凸显,其方法也逐渐由条件概率理论方法向非线性和复杂性理论及模型发展。

2 大数据分析在矿产资源评价领域的应用

随着信息技术的迅猛发展,当今社会进入了第四范式时代——大数据挖掘时代^[37-39]。面对海量数字化资料的不断积累,大数据分析技术因其高效的知识发现和分析能力逐渐被应用到地球科学领域^[40-41]。国际上均在推动地质大数据的发展,如 EarthServer 大地球数据分析引擎的研发^[42]、美国国家科学基金会于 2012 年启动的 EarthCube 项目^[43]等,通过大数据方式,提出了新的复杂地球系统的表述和认识。

国内学者讨论了地质大数据的混合性、抽样性、因果性、时空性、多态性和多元性特征,指出数字地质是地球科学的数据科学,并提出建立和发展适应大数据时代特征的矿产预测评价数据科学十分必要^[44];进一步分析了大数据、深度机器学习与复杂人工智能等数学地球科学前缘在矿产资源和能源定量预测和评价中的应用发展^[45]。在此背景下,众多卓有成效的工作逐渐开展,大数据思维下的矿产预测模型理论、多学科信息相关性分析、预测地质求异理论、矿产区域趋势分析方法等矿产资源定量预测与评价基本理论和方法初步形成^[46-52]。

在具体的评价工作中,对多源空间数据进行特征提取和集成融合成为核心问题和研究热点,不同学者从多个角度对基于知识、数据、模型混合驱动的机器学习和深度学习等大数据分析方法进行了研究探索。随机森林等算法逐渐应用于成矿预测领域,其优秀的拟合和泛化性能被验证^[53-54],针对缺失值和小样本训练集处理预测的相关模型不断迭代优化;基于数据科学的矿产资源定量预测理论与方法以及引入的不确定性分析不断被讨论^[55],基于机器学习、深度学习的深层次矿化信息挖掘与集成逐渐发展起来。

大数据挖掘与集成在陆地矿产资源定量预测评价领域取得了良好的应用效果^[56-64],相较于传统地

质统计学方法,以随机森林等机器学习、深度学习算法为代表的大数据分析方法,在复杂数据深层次分析挖掘、致矿异常信息关联转换、多源数据致矿异常信息综合集成等方面具有明显的优势。

对于深海矿产资源评价来说,科学工作同样属于数据密集型范畴,数据获取难度大、成本高,数据混合性、变异性、稳健性、相关性等随时间、空间及地质体不同而各异,亟须依据大数据分析等方法数据科学识别、提取与矿床时空分布相关的特征,刻画特征复杂的空间耦合关系。目前大数据技术理念和方法在该领域的应用仍然处于探索阶段。

3 面向多金属结核资源评价的大数据挖掘与融合

可以发现,多金属结核资源评价大数据的特征信息挖掘和基于大数据分析的多源异构资源-环境

数据的融合集成将成为未来资源评价的关键科学问题。基于科学问题分析,本文研究探索了面向多金属结核资源评价的大数据挖掘与融合技术方法(图 1),具体包括多金属结核资源地质模型知识谱系分析、多源异构资源-环境数据特征信息挖掘、基于大数据空间决策分析的融合集成,以及多金属结核资源评价对比验证等关键环节。

3.1 多金属结核资源地质模型知识谱系分析

知识谱系分析 应用创新多主题、无模式知识挖掘和发现等技术方法,挖掘半结构化、非结构化数据(科技文献、研究报告等)资料,分析多金属结核产出的区域地质特征,总结控制结核形成过程中的能量驱动、物质迁移、富集和保存机制,建立多金属结核资源地质模型知识谱系(图 2),初选资源评价潜在因素,为信息挖掘和空间决策提供地质先验知识和约束。

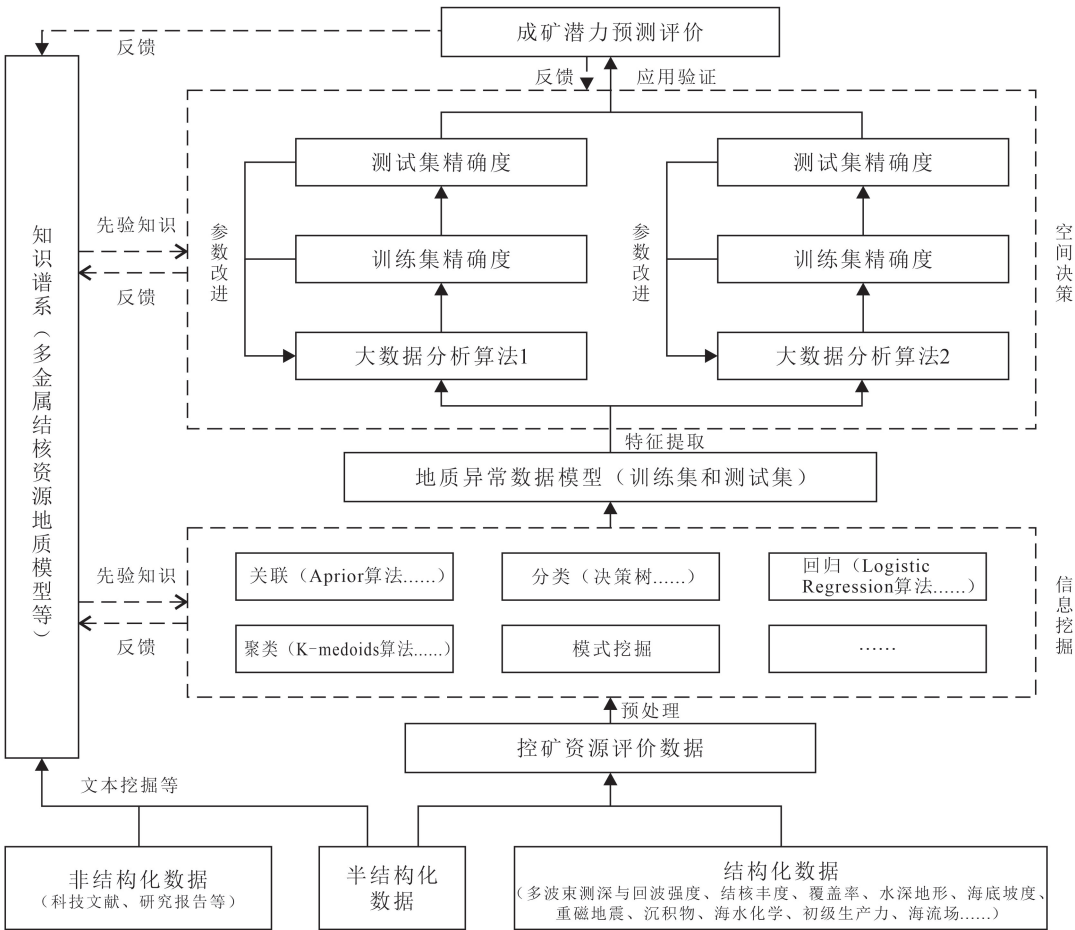


图 1 面向多金属结核资源评价的大数据挖掘与融合技术流程

Fig.1 Technique process of big data mining and fusion towards resources evaluation of deep-sea polymetallic nodules

表 1 深海多金属结核资源评价专题数据

Table 1 Thematic data for deep-sea polymetallic nodules resources evaluation

序号	数据名称	来源与内容等
1	多波束测深、回波强度等数据	
2	常量、微量、稀土元素等化学分析测试数据	
3	覆盖率、丰度等数据	大洋科考调查、大洋研究课题、 国际公开共享
4	湿密度、含水率等数据	
5	矿物鉴定等数据	
6	其他分析测试数据等	
7	现场分析数据等	
8	多金属结核专题图件	大洋研究课题
9	海水化学数据	CCD 层等相关内容
10	海流场数据	全球范围/重点海域
11	全球初级生产力、叶绿素数据	海洋环境遥感数据,共享
12	底质数据产品	全球范围,海洋专项
13	基础地理数据	海洋专项
14	水深地形数据	海洋专项、网络共享数据
15	全球海底坡度数据	大洋研究课题、网络共享数据
16	全球海山分布数据	网络共享数据
17	重力数据	网络共享数据
18	磁力数据	网络共享数据
19	扩张速率数据	网络共享数据
20	沉积物厚度数据	网络共享数据
21	洋底基岩年龄数据	网络共享数据
22	全球大洋科学考察航次信息数据	大洋研究课题
23	全球海底构造信息数据	网络共享数据(GEBCO)
24	全球大洋综合钻探井孔信息数据	大洋研究课题、网络共享数据
25	岩石地球化学数据	网络共享数据(Earthchem)
26	海底热流数据	网络共享数据(HEATFLOW)
27	全球应力数据	网络共享数据
28	参考文献数据	网络共享数据
29	其他数据等	网络共享数据

注:CCD, carbonate compensation depth;GEBCO, general bathymetric chart of the oceans。

medoids 算法等)、模式挖掘、深度学习(卷积神经网络等)和异常检测等大数据分析方法,对预测要素数据进行分类关联(图 3),构建基于大数据的地质异常数据模型(训练集和测试集)。

基于数据科学的特征提取 探索应用大数据分析方法突破参数、模型、模式的限制,对多金属结核资源评价大数据进行特征提取,包括多波束回波强度分析、断裂构造缓冲区分析、地形坡度关联关系、重磁地震异常识别、底层流、海水化学、初级生物生产力分布等扩大化资源评价因素或异常组合,为空间决策提供关系基础。

3.3 基于大数据空间决策分析的融合集成

空间决策支撑模型构建 分析对比证据权、逻辑回归、人工神经网络等经典资源评价原理和方法流程,基于特征信息挖掘提取,应用随机森林等多种

机器学习方法,融合分析各类控制因素、异常组合与多金属结核资源的空间耦合关系,构建训练区空间决策支撑模型。

模型性能评价验证 应用验证区数据开展模型性能评价,分析模型性能和 ROC(receiver operating characteristic)曲线等相关参数指标,进一步调优,改进基于多种大数据分析方法的空間决策支持模型,减少评价的不确定性。同时,根据性能评价结果,进一步反馈丰富知识谱系。

3.4 多金属结核资源评价对比验证

多金属结核资源评价应用 基于训练验证区空间决策支撑模型训练构建和验证成果,面向预测评价区开展多金属结核资源空间分布估计、富矿区圈定、潜力等级划分等成矿潜力预测评价分析。

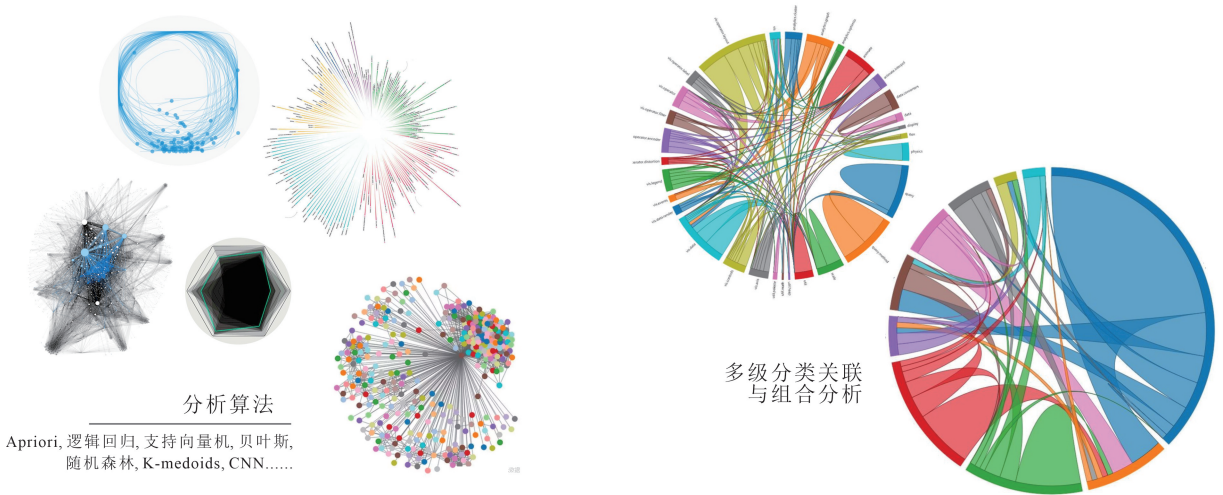


图 3 面向多源异构深海资源-环境数据的算法优选

Fig.3 Algorithm optimization towards the multi-source and heterogeneous deep-sea sources-environmental data

模型迭代改进 与多金属结核知识谱系(预测评价区)相关研究成果开展对比分析,根据对比分析结果迭代改进基于多种大数据分析方法的空間决策支持模型,形成最优参数设计图版,实现大数据空間决策分析,指导多金属结核资源预测评价。

4 相关思考

目前我国新申请的西太平洋多金属结核勘探合同区评价需求较大,考虑到深海矿产资源数据获取难度大、成本高,如何高效利用已有资源-环境数据和研究成果,实现多来源、多类型学科要素未知、潜在知识发现,应用较为经济的方式开展预测评价,合理有效地指导、支撑多金属结核等深海战略性矿产资源调查和开发研究,是亟待解决的关键问题。

近几十年的调查和研究表明,全球深海海域还有很多涉及到具体区域的新资源调查工作有待开展,传统评价技术方法严重受限于实测数据稀少、分布不均以及难以刻画复杂非线性空間分布模式等现实问题,整体空間相关性考虑不够。如何应用基于数据科学的大数据分析方法融合多源异构资源-环境数据,刻画深海矿产资源复杂的非线性空間耦合关系,实现高效预测评价,丰富相关理论和实践,亟待深入研究。

基于以上考虑,围绕深海多金属结核资源评价大数据挖掘分析与融合集成等关键科学问题,利用基于数据科学的大数据分析方法,深入分析挖掘常规/非常規资源评价数据及其与矿床的相关关系,构

建符合知识谱系约束的大数据空間决策支持推理模型,探索多源异构资源-环境数据的挖掘分析和集成融合技术方法,可为提高深海多金属结核资源预测和评价的精度和效率,提供基于大数据的技术解决途径。

5 结论

1)深海矿产资源评价逐渐转向数据科学范式,深层次找矿-示矿大数据的挖掘与融合逐渐成为多金属结核资源评价的关键技术手段,也是制约深海矿产资源-环境数据高效利用和精细化表征水平的主要问题。

2)探索了面向多金属结核资源评价的大数据挖掘与融合技术方法,包括多金属结核资源地质模型知识谱系分析、多源异构资源-环境数据特征信息挖掘、基于大数据空間决策分析的融合集成,以及多金属结核资源评价对比验证等内容。

3)聚焦多金属结核,探索性开展深海矿产资源评价大数据挖掘与融合技术研究,创新基于数据科学的深海矿产资源预测评价相关特征提取和数据集成融合方法,提高资源评价精度和效率,对于新多金属结核矿区的勘探评价以及其他深海矿种的预测评价具有重要的理论价值和实践意义。

参考文献(References):

[1] 张富元,章伟艳,王英,等.大洋多金属结核资源评价原理和矿区圈定方法[M].北京:海洋出版社,2001.

- Zhang Fuyuan, Zhang Weiyan, Wang Ying, et al. The Principle of Resource Estimation and Method of Delineating Mining Area of Polymetallic Nodules in Ocean[M]. Beijing: Ocean Press, 2001.
- [2] 周怀阳, 吕文正, 周宁, 等. 东北太平洋多金属结核矿床地质模型[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- Zhou Huaiyang, Lü Wenzheng, Zhou Ning, et al. The Ore Geological Model of Polymetallic Nodules in Northeast Pacific Ocean [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [3] Hein J R, Spinardi F, Okamoto N, et al. Critical Metals in Manganese Nodules from the Cook Islands EEZ, Abundances and Distributions[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 68: 97–116.
- [4] Hein J R, Koschinsky A, Kuhn T. Deep-Ocean Polymetallic Nodules as a Resource for Critical Materials [J]. Nature Reviews (Earth and Environment), 2020, 1: 158–169.
- [5] 初凤友, 姜静, 刘禹维, 等. 我国深海多金属结核资源的勘探进展与思考[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2638–2648.
- Chu Fengyou, Jiang Jing, Liu Yuwei, et al. Advance and Implication for Polymetallic Nodules Resources Exploration in Deep-Sea[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2638–2648.
- [6] 刘峰, 刘予, 宋成兵, 等. 中国深海大洋事业跨越发展的三十年[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2613–2623.
- Liu Feng, Liu Yu, Song Chengbing, et al. Three Decades' Development of China in Deep-Sea Field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2613–2623.
- [7] 石学法, 符亚洲, 李兵, 等. 我国深海矿产研究: 进展与发现(2011—2020年)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(2): 305–318, 517.
- Shi Xuefa, Fu Yazhou, Li Bing, et al. Research on Deep-Sea Minerals in China: Progress and Discovery (2011–2020) [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(2): 305–318, 517.
- [8] Hein J R, Koschinsky A. Deep-Ocean Ferromanganese Crusts and Nodules[J]. Treatise on Geochemistry, 2014, 13: 273–291.
- [9] 左仁广. 基于数据科学的矿产资源定量预测的理论与方法探索[J]. 地学前缘, 2021, 28(3): 49–55.
- Zuo Renguang. Data Science-Based Theory and Method of Quantitative Prediction of Mineral Resources [J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(3): 49–55.
- [10] Cox D P, Singer D A. Mineral Deposit Models[M]. Washington: United States Government Printing Office, 1986.
- [11] Roberts R G, Sheahan P A. Ore Deposit Models[M]. Winnipeg: Canada Geosciences, 1988.
- [12] Singer D A. Basic Concepts in Three-Part Quantitative Assessments of Undiscovered Mineral Resources[J]. Nonrenewable Resources, 1993, 2(2): 69–81.
- [13] 李裕伟, 赵精满, 李晨阳. 基于GMS、DSS和GIS的潜在矿产资源评价方法[M]. 北京: 地震出版社, 2007.
- Li Yuwei, Zhao Jingman, Li Chenyang. The Potential Mineral Evaluating Methods Based on GMS, DSS and GIS[M]. Beijing: Seismological Press, 2007.
- [14] Hein J R, Mizell K, Koschinsky A, et al. Deep-Ocean Mineral Deposits as a Source of Critical Metals for High- and Green-Technology Applications: Comparison with Land-Based Resources [J]. Ore Geology Reviews, 2013, 51: 1–14.
- [15] Sharma R. Deep-Sea Mining [M]. Amsterdam: Elsevier, 2017.
- [16] Koschinsky A, Hein J R. Marine Ferromanganese Encrustations: Archives of Changing Oceans [J]. Elements, 2017, 13: 177–182.
- [17] Bau M, Schmidt K, Koschinsky A, et al. Discriminating Between Different Genetic Types of Marine Ferro-Manganese Crusts and Nodules Based on Rare Earth Elements and Yttrium[J]. Chemical Geology, 2014, 381: 1–9.
- [18] ISA (International Seabed Authority). A Geologic Model for Polymetallic Nodule Deposits in the Clarion-Clipperton Fracture Zone [R]. Kingston: ISA, 2010: 211.
- [19] Parianos J, Lipton I, Nimmo M. Aspects of Estimation and Reporting of Mineral Resources of Seabed Polymetallic Nodules: A Contemporaneous Case Study[J]. Minerals, 2021, 11(2): 200.
- [20] Ellefmo S L, Kuhn T. Application of Soft Data in Nodule Resources Estimation[J]. Natural Resources Research, 2021, 30: 1069–1091.
- [21] 张富元, 章伟艳, 王英, 等. 大洋多金属结核资源评价的基本理论与方法[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 169–176.
- Zhang Fuyuan, Zhang Weiyan, Wang Ying, et al. Theory and Method of Polymetallic Nodule Resources Evaluation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19

- (2): 169 - 176.
- [22] Wasilewska M, Mucha J. Possibilities and Limitations of the Use of Seafloor Photographs for Estimating Polymetallic Nodule Resources: Case Study from IOM Area, Pacific Ocean[J]. Minerals, 2020, 10: 1123.
- [23] Fu Y, Wen H. Variabilities and Enrichment Mechanisms of the Dispersed Elements in Marine Fe - Mn Deposits from the Pacific Ocean[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 121: 103470.
- [24] 杜德文, 孟宏伟, 石学法, 等. CC 西区多金属资源评价的协同区域化理论和方法[J]. 海洋学报, 2005, 27(2): 98 - 105.
- Du Dewen, Meng Xianwei, Shi Xuefa, et al. Co-Kriging Model of Manganese Nucleus Mineral Resource Evolution in the CC Region of the Pacific Ocean[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(2): 98 - 105.
- [25] 王恺其, 肖凡. 多点地质统计学的理论、方法、应用及其发展现状[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 256 - 268.
- Wang Kaiqi, Xiao Fan. Multi-Points Geostatistics: A Review of Theories, Methods and Applications[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(6): 256 - 268.
- [26] 韩喜球, 李家彪, 王英, 等. 分形理论在太平洋多金属结核分布研究中的应用[J]. 海洋学报, 2001, 23(3): 142 - 146.
- Han Xiqiu, Li Jiabiao, Wang Ying, et al. Application of Fractal Theory to Distribution of Polymetallic Nodules from the Pacific Ocean [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(3): 142 - 146.
- [27] 刘永刚, 杜德文, 曲镜如, 等. 基于 Fuzzy ARTMAP 的 CC 区多金属结核资源定量评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(2): 169 - 179.
- Liu Yonggang, Du Dewen, Qu Jingru, et al. Quantitative Assessment of Polymetallic Nodules Resource of CC Zone Based on Fuzzy ARTMAP[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(2): 169 - 179.
- [28] 何高文, 赵祖斌, 朱克超, 等. 西太平洋富钴结壳资源[M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- He Gaowen, Zhao Zubin, Zhu Kechao, et al. The Co-Rich Crust Resources in West Pacific Ocean[M]. Beijing: Geology Press, 2001.
- [29] 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, 2008, 33(2): 251 - 258.
- Zhang Fuyuan, Zhang Weiyan, Zhu Kechao, et al. Parameter and Index for Delineation and Evaluation of Co-Rich Crust Resources[J]. Earth Science, 2008, 33(2): 251 - 258.
- [30] 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.
- Ma Weilin, Chu Fengyou, Jin Xianglong. Method Approach of Resource Assessment and Ore Delineation for Cobalt-Rich Crust [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(2): 67 - 73.
- [31] Yang Y, He G, Ma J, et al. Acoustic Quantitative Analysis of Ferromanganese Nodules and Cobalt-Rich Crusts Distribution Areas Using EM122 Multibeam Backscatter Data from Deep-Sea Basin to Seamount in Western Pacific Ocean[J]. Deep-Sea Research Part I, 2020, 161: 103281.
- [32] 马金凤, 杨永, 邓希光, 等. 西太平洋海底多金属结核空间分布与多波束回波强度的关系[J]. 地质通报, 2021, 40(2/3): 392 - 400.
- Ma Jinfeng, Yang Yong, Deng Xiguang, et al. Relation of the Distribution of Bottom Polymetallic Manganese Nodules to Multibeam Backscatter in West Pacific[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(2/3): 392 - 400.
- [33] Du D, Wang C, Du X, et al. Distance-Gradient-Based Variogram and Kriging to Evaluate Cobalt-Rich Crust Deposits on Seamounts[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 84: 218 - 227.
- [34] Du D, Ren X, Yan S, et al. An Integrated Method for the Quantitative Evaluation of Mineral Resources of Cobalt-Rich Crusts on Seamounts[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 84: 174 - 184.
- [35] 陈建平, 李婧, 崔宁, 等. 大数据背景下地质云的构建与应用[J]. 地质通报, 2015, 34(7): 1260 - 1265.
- Chen Jianping, Li Jing, Cui Ning, et al. The Construction and Application of Geological Cloud Under the Big Data Background [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(7): 1260 - 1265.
- [36] 沈芳, 韩喜球, 李洪林, 等. 海底多金属硫化物资源预测: 方法与思考[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2682 - 2695.
- Shen Fang, Han Xiqiu, Li Honglin, et al. Prediction of Seafloor Polymetallic Sulfide Resources: Methods and Consideration [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2682 - 2695.
- [37] Mattmann C A. A Vision for Data Science [J].

- Nature, 2013, 493: 473 - 475.
- [38] Wouter L, John W. Dealing with Big Data [J]. Science, 2011, 331: 639 - 806.
- [39] Hand D J, Mannila H, Smyth P. Principles of Data Mining[M]. Cambridge: MIT Press, 2011.
- [40] 赵鹏大. 大数据时代数字找矿与定量评价[J]. 地质通报, 2015, 34(7): 1255 - 1259.
Zhao Pengda. Digital Mineral Exploration and Quantitative Evaluation in the Big Data Age [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(7): 1255 - 1259.
- [41] Silver D, Schrittwieser J, Simonyan K, et al. Mastering the Game of Go Without Human Knowledge[J]. Nature, 2017, 550: 334 - 359.
- [42] Baumann P, Mazzetti P, Ungar J, et al. Big Data Analytics for Earth Science: The Earth Server Approach[J]. International Journal of Digital Earth, 2016, 9(1): 3 - 29.
- [43] Li Shi, Chen Jianping, Liu Chang. Overview on the Development of Intelligent Methods for Mineral Resource Prediction Under the Background of Geological Big Data[J]. Minerals, 2022, 12(5): 616.
- [44] 赵鹏大. 地质大数据特点及其合理开发利用[J]. 地学前缘, 2019, 26(4): 1 - 5.
Zhao Pengda. Characteristics and Rational Utilization of Geological Big Data[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(4): 1 - 5.
- [45] 成秋明. 什么是数字地球科学及其前沿领域? [J]. 地学前缘, 2021, 28(3): 6 - 25.
Cheng Qiuming. What are Mathematical Geosciences and Its Frontiers? [J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(3): 6 - 25.
- [46] 肖克炎, 孙莉, 李楠, 等. 大数据思维下的矿产资源评价[J]. 地质通报, 2015, 34(7): 1266 - 1272.
Xiao Keyan, Sun Li, Li Nan, et al. Mineral Resources Assessment Under the Thought of Big Data[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(7): 1266 - 1272.
- [47] 王登红, 刘新星, 刘丽君. 地质大数据的特点及其在成矿规律、成矿系列研究中的应用[J]. 矿床地质, 2015, 34(6): 1143 - 1154.
Wang Denghong, Liu Xinxing, Liu Lijun. Characteristics of Big Geodata and Its Application to Study of Minerogenetic Regularity and Minerogenetic Series [J]. Mineral Deposits, 2015, 34(6): 1143 - 1154.
- [48] 陈建平, 任梦依, 方捷, 等. 洋中脊多金属硫化物成矿定量预测[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- Chen Jianping, Ren Mengyi, Fang Jie, et al. The Quantitative Prediction of Polymetallic Sulfide in Mid-Oceanic Ridges [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [49] 周永章, 王俊, 左仁广, 等. 地质领域机器学习、深度学习及实现语言[J]. 岩石学报, 2018, 34(11): 3173 - 3178.
Zhou Yongzhang, Wang Jun, Zuo Renguang, et al. Machine Learning, Deep Learning and Python Language in Field of Geology [J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(11): 3173 - 3178.
- [50] 罗建民, 张旗. 大数据开创地学研究新途径: 查明相关关系, 增强研究可行性[J]. 地学前缘, 2019, 26(4): 6 - 12.
Luo Jianmin, Zhang Qi. Big Data Pioneers New Ways of Geoscience Research: Identifying Relevant Relationships to Enhance Research Feasibility [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(4): 6 - 12.
- [51] 吴冲龙, 刘刚, 周琦, 等. 地质科学大数据统合应用的基本问题[J]. 地质科技通报, 2020, 39(4): 1 - 11.
Wu Chonglong, Liu Gang, Zhou Qi, et al. Fundamental Problems of Integrated Application of Big Data in Geoscience [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(4): 1 - 11.
- [52] 周永章, 左仁广, 刘刚, 等. 数学地球科学跨越发展的十年: 大数据、人工智能算法正在改变地质学[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(3): 556 - 573.
Zhou Yongzhang, Zuo Renguang, Liu Gang, et al. The Great-Leap-Forward Development of Mathematical Geoscience During 2010 - 2019: Big Data and Artificial Intelligence Algorithm are Changing Mathematical Geoscience [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(3): 556 - 573.
- [53] Carranza E J M, Laborte A G. Data-Driven Predictive Mapping of Gold Prospectivity, Baguio District, Philippines: Application of Random Forests Algorithm [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 71: 777 - 787.
- [54] McKay G, Harris J R. Comparison of the Data-Driven Random Forests Model and a Knowledge-Driven Method for Mineral Prospectivity Mapping: A Case Study for Gold Deposits around the Huritz Group and Nuelin Suite, Nunavut, Canada [J]. Natural Resources Research, 2016, 25(2): 125 - 143.
- [55] 左仁广, 彭勇, 李童, 等. 基于深度学习的地质找矿

- 大数据挖掘与集成的挑战[J]. 地球科学, 2021, 46(1): 350-358.
- Zuo Renguang, Peng Yong, Li Tong, et al. Challenges of Geological Prospecting Big Data Mining and Integration Using Deep Learning Algorithms [J]. Earth Science, 2021, 46(1): 350-358.
- [56] 向杰, 陈建平, 肖克炎, 等. 基于机器学习的三维矿产定量预测: 以四川拉拉铜矿为例[J]. 地质通报, 2019, 38(12): 2010-2021.
- Xiang Jie, Chen Jianping, Xiao Keyan, et al. 3D Metallogenic Prediction Based on Machine Learning: A Case Study of the Lala Copper Deposit in Sichuan Province[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(12): 2010-2021.
- [57] 张夏林, 吴冲龙, 周琦, 等. 基于勘查大数据和数据集市 的 锰 矿 床 三 维 地 质 建 模 [J]. 地 质 科 技 通 报, 2020, 39(4): 12-20.
- Zhang Xialin, Wu Chonglong, Zhou Qi, et al. Three-Dimensional Geological Modeling of Manganese Deposits Based on Exploration Big Data and Data Market [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(4): 12-20.
- [58] 陈进, 毛先成, 刘占坤, 等. 基于随机森林算法的大尹格庄金矿床三维成矿预测[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(2): 231-241.
- Chen Jin, Mao Xiancheng, Liu Zhankun, et al. Three-Dimensional Metallogenic Prediction Based on Random Forest Classification Algorithm for the Dayingezhuang Gold Deposit [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2020, 44(2): 231-241.
- [59] 刘艳鹏, 朱立新, 周永章. 大数据挖掘与智能预测找矿靶区实验研究[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(2): 192-202.
- Liu Yanpeng, Zhu Lixin, Zhou Yongzhang. Experimental Research on Big Data Mining and Intelligent Prediction of Prospecting Target Area[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2020, 44(2): 192-202.
- [60] 张士红. 基于深度学习的四川会理“拉拉式”铜矿找矿预测研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Zhang Shihong. Deep Learning for Mineral Prospectivity Mapping of Lala-Type Copper Deposit in the Huili Region, Sichuan [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [61] 李苍柏, 肖克炎, 李楠, 等. 支持向量机、随机森林和人工神经网络机器学习算法在地球化学异常信息提取中的对比研究[J]. 地球学报, 2020, 41(1): 309-319.
- Li Cangbai, Xiao Keyan, Li Nan, et al. A Comparative Study of Support Vector Machine, Random Forest and Artificial Neural Network Machine Learning Algorithms in Geochemical Anomaly Information Extraction [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(1): 309-319.
- [62] 马瑶, 赵江南. 机器学习方法在矿产资源定量预测应用研究进展[J]. 地质科技通报, 2021, 40(1): 132-141.
- Ma Yao, Zhao Jiangnan. Advances in the Application of Machine Learning Methods in Mineral Prospectivity Mapping [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(1): 132-141.
- [63] 李忠潭, 薛林福, 冉祥金, 等. 基于卷积神经网络 的 智 能 找 矿 预 测 方 法: 以 甘 肃 龙 首 山 地 区 铜 矿 为 例 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 418-433.
- Li Zhongtan, Xue Linfu, Ran Xiangjin, et al. Intelligent Prospect Prediction Method Based on Convolutional Neural Network: A Case Study of Copper Deposits in Longshoushan Area, Gansu Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 418-433.
- [64] 张永哲, 成山林, 李跃东, 等. 多源信息找矿预测技术研究及其应用: 以吉林省砂金沟金矿床为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(6): 1855-1866.
- Zhang Yongzhe, Cheng Shanlin, Li Yuedong, et al. Research and Application of Multi-Source Information for Ore Prospecting and Prediction: Taking Jilin Shajingou Gold Deposit as an Example[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(6): 1855-1866.