

大数据框架下金刚石地质成矿信息挖掘及应用

周冠云^{1, 2)}, 朱成河^{3, 4)*}, 高存山^{3, 4)}, 褚志远^{3, 4)},
肖克炎⁵⁾, 王江霞^{1, 2)}, 陈建平^{1, 2)}

1) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2) 北京市国土资源信息研究开发重点实验室, 北京 100083;

3) 山东省第七地质矿产勘查院, 山东沂蒙 276600;

4) 山东省地质矿产勘查开发局金刚石成矿机理与探测重点实验室, 山东沂蒙 276600;

5) 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

摘 要: 随着大数据时代的到来, 地质行业将大数据作为新兴增长点进行培育和挖掘, 以山东蒙阴金刚石矿集区为研究对象, 基于大数据实现地质工作和信息技术的深度融合, 通过数据统计、挖掘、洞察与预测等分析并集成融合与成矿系统相关的源、运、储、变、保等知识, 全面提取蒙阴地区多元地质信息, 建立西峪矿区金刚石矿多项指标的成矿地质信息模型, 开展三维可视化成矿预测, 进而圈定找矿远景区。探寻金刚石大数据管理、分析及成矿预测新技术方法, 促进成矿新认知与找矿新发现。

关键词: 蒙阴金矿集区; 大数据; 成矿地质信息; 三维成矿预测

中图分类号: P619.241 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.010101

Mining and Application of Diamond Geological Metallogenic Information under the Framework of Big Data

ZHOU Guan-yun^{1, 2)}, ZHU Cheng-he^{3, 4)*}, GAO Cun-shan^{3, 4)}, CHU Zhi-yuan^{3, 4)},
XIAO Ke-yan⁵⁾, WANG Jiang-xia^{1, 2)}, CHEN Jian-ping^{1, 2)}

1) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;

2) Beijing Key Laboratory of Land and Resources Information Research and Development, Beijing 100083;

3) The 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province, Yimeng, Shandong 276600;

4) Key Laboratory Metallogenic Mechanism and Exploration of Diamonds in Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Yimeng, Shandong 276600;

5) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: With the arrival of the era of big data, the geological industry has cultivated and excavated big data as a new growth point. Taking the Mengyin diamond concentration area in Shandong Province as the research object, the deep integration of geological work and information technology is realized based on big data. Through data statistics, mining, insight and prediction, the analysis and integration of source, transport, storage, change, protection and other knowledge related to the mineralization system are conducted, with the comprehensive extraction of multiple geological information in Mengyin area, the establishment of a multi index metallogenic geological information model for the diamond deposit in Xiyu mining area, the development of three-dimensional visual metallogenic prediction, and then the delineation of prospecting prospects. Explore the management, analysis and application of diamond big data and new technology and methods for metallogenic prediction, realize the mapping from geological big data to unit metallogenic advantage, quantitative prediction and definite probability analysis, improve the objectivity and intelligent level of metallogenic prediction, and promote new cognition of mineralization and new discovery of prospecting.

Key words: Mengyin gold concentration area; big data; metallogenic geological information; three dimensional metallogenic prediction

本文由山东省地质矿产勘查开发局[0]金刚石勘查大数据平台建设项目(编号: KY202212)资助。

收稿日期: 2022-10-28; 改回日期: 2022-11-28; 网络首发日期: 2023-01-04。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 周冠云, 男, 1996 年生。博士研究生。主要从地质大数据及成矿预测研究。通讯地址: 100083, 北京市海淀区学院路 29 号中国地质大学(北京)。E-mail: zhou553908246@163.com。

*通讯作者: 朱成河, 男, 1983 年生。高级工程师。主要从事地质调查与矿产勘查。E-mail: 1762656606@qq.com。

原生金刚石矿床主要分布于华北克拉通的辽宁瓦房店和山东蒙阴地区(吴成平等, 2016), 传统地质找矿方法在金刚石矿找矿方面存有瓶颈, 目前山东省金刚石矿累计查明资源储量稳居全国第一, 特别是蒙阴地区深部金刚石矿找矿潜力巨大, 目前金伯利岩侵位时代、深部构造对金伯利岩的控制作用、深部成矿模式、找矿技术方法有效组合及深部资源预测评价指标体系等问题亟待解决, 矿产勘查项目急需深部资源预测、评价理论指导。

大数据驱动研究范式正在引起地质领域的革命, 地质大数据作为专业领域基本信息与大数据特征十分吻合(陈建平等, 2017)。赵鹏大院士提出: 将大数据概念引入地质领域, 提出数字找矿的概念, 实现“数学地质”到“数字地质”的飞跃, 弥补传统定性找矿的缺陷, 结合四大找矿预测理论, 对矿产预测做出科学的定量评价与分析, 是未来的必然发展趋势(滕艳和张地珂, 2013)。我国目前正处于利用地球大数据资源建设, 驱动科学发现, 引擎科研创新的阶段。目前山东省地矿局其他各单位在国家大数据战略背景下, 就如何加快自然科学与社会科学交叉融合, 推动互联网、大数据、人工智能与地质工作深度融合进行初探, 且基于现有金刚石地质数据建设开展了数据整理工作。亟需建立新型的面向地质结构-属性耦合表达的统一空间数据模型以及知识驱动与数据驱动协同的地质大数据集成建模技术体系(陈麒玉等, 2020)。

成矿时代、构造环境、地质成矿作用和成矿元素或矿种是矿床成矿的四要素(王登红等, 2011), 地质构造环境是成矿体系的基础, 区域地球化学和区域地球物理是成矿的显示, 矿床成矿系列是构成成

矿体系的基本单位, 成矿区带是成矿体系的载体, 而成矿预测则是成矿体系研究的应用目标。深部矿产预测依赖于对研究区深部成矿构造推断和矿化分布规律认识, 深部成矿构造及深部成矿作用已成为当前深部找矿工作中的研究热点(翟裕生, 1999; 赵文津, 2003; 肖克炎等, 2014; 向杰等, 2020)。以山东蒙阴金刚石矿集区为研究对象, 重点为西峪金伯利岩带, 研究深部成矿系统、深部三维结构和控矿要素, 建立隐伏金刚石矿成矿模式; 通过大数据平台对成矿与找矿资料进行分析整理和数字化工作, 建立西峪矿区金刚石矿基础数据库, 定量分析控矿条件, 总结深部资源赋存规律, 提取控矿要素, 建立金刚石成矿系统时空与物质结构的成矿模型; 通过对比分析研究隐伏金刚石矿找矿技术方法的有效组合, 圈定成矿靶区。实现从地质大数据到单元成矿有利度的映射, 定量预测和定概率分析, 提高成矿预测的客观性和智能化水平, 主要技术路线见图 1。

1 地质大数据分析

西峪金刚石矿区主要位于山东省临沂市蒙阴县境内, 位于山东省中南部, 泰沂山脉腹地、蒙山之阴, 东经 $117^{\circ}45'00''$ — $118^{\circ}15'00''$, 北纬 $35^{\circ}30'00''$ — $36^{\circ}00'00''$ 。大数据的特征是数据规模大, 并经常呈异构多模态、复杂关联、动态涌现等特点(周永章等, 2017)。本研究利用蒙阴金刚石大数据平台对研究区内资料进行分析。利用平台充分收集分析西峪矿集区金伯利岩带资料, 实物工作量见表 1。对已知金伯利岩体的产状、形态、规模等特征进行调查, 并采集不同区域、不同类型、不同深度的金伯利岩岩石标本和样品。



图 1 地质大数据成矿信息挖掘及应用技术路线图

Fig. 1 Roadmap of Geological Metallogenic Information Mining and Application Technology

本研究采用的多元地质大数据主要包括地质、物探、化探、遥感等资料数据,利用蒙阴大数据平台对数据按照项目分类,并对附件、附图、报告及相关金刚石文献资料多源信息整合分析,反演矿区尺度上成矿信息。通过研究这些成矿信息的空间特征和变化趋势,还原成矿过程的细节,进而指导勘查区尺度上成矿潜力的定量评价和具体探矿工程布置(刘利宝等, 2019)。

在对地质大数据进行分析的基础上,通过详细的野外地质调查,并结合科学合理的测试研究手段,总结蒙阴金伯利岩地质特征及金刚石原生矿成矿规律,提出蒙阴金伯利岩构造控矿的特征,得到以下认识。

蒙阴已发现的金伯利岩侵入时代至少存在两个时期:一期侵位时间为早侏罗世;二期侵位时间在早白垩世晚期。金刚石中的碳来源于地幔原始碳,温度、压力和氧逸度对金刚石的形成起着主要的控制作用,金刚石内部生长显示多期生长的特点,反映其生长环境不稳定。

在总结蒙阴金刚石形成环境、金伯利岩形成条件基础上建立蒙阴金刚石原生矿成矿模式。

在成矿系列研究方面,综合对地表地质数据、槽-井-坑-洞-钻孔数据、重力数据、地球化学数据、电法磁法数据等进行深度信息挖掘、找矿信息提取。海量地质资料是进行三维建模预测找矿的数据基础,全面的地质资料对最后模型的精准尺度有着直接的影响,数据资料越丰富精细,所建立的模型也就可以越准确。基于收集到的各种基础地质资料其数据格式,标志等方面的不一致,需要先将各种地质

资料进行整理分析建立好基础资料数据库,将其精度,维度等问题规范化和统一化。收集到的基础资料包括西峪矿区的综合地质图、地质剖面图、钻孔编录数据、中段地质平面图、地形等高线及矿区勘查报告等(表 2)。

2 地质大数据应用

2.1 三维实体模型的构建

在地质研究层面上,构建三维地质模型主要就是依照各种二维数据,通过各种地质要素在二维的界线形态变化来帮助构建出其三维空间上的整体形态所得到的一个数字化模型。通过三维地质模型,可以有效地观察到各个地质体的深部特征及变化规律,并在其帮助下进行进一步的各类研究工作。通过地表等高线数据构建矿区、矿区外围及矿带南端区域的地表实体模型,并通过连续插值方法构建了矿区的矿体实体模型和构造实体模型,利用外围推测方法构建了矿区外围的构造实体模型(图 2—图 5)。

2.2 成矿预测及靶区圈定

利用蒙阴大数据平台挖掘整理的数据库,对蒙阴地区的大地构造背景、成矿时代、矿化类型和成因类型进行了相关分析后,结合该区实际数据资料建立出区域的找矿模型。首先由大地构造背景及成因类型明显的发现区域的断裂构造对金伯利岩成矿具有明显的控矿作用,其断裂构造应当作为成矿预测的一个主体研究对象。对于其成矿时代的研究,本研究认为中生代是该区重要的成矿期之一。蒙阴三个金伯利岩带地层分布简单,主要出露的地层为古生代中生代的灰页岩和砂砾岩类,这些地层在进行成矿预测中缺少其致矿的指示性依据。对于该区矿化标志的研究,蒙阴金伯利岩矿床其围岩蚀变比较微弱,难以进行相关针对性研究。本次对蒙阴矿区的成矿预测有利信息主要集中在断裂构造信息的研究,基于此建立了蒙阴地区的地质找矿模型(表 3)。

三维成矿有利信息提取主要是在对研究区完成的三维空间异常重构基础上,通过将各个异常信息与已知矿体进行叠合统计分析,确定各个异常信息中的成矿有利异常信息及其区间,为最后的量化综合预测提供基础。

根据建立的找矿地质模型对连续插值的矿区区域进行成矿有利信息提取分析。首先对矿区区域内的断裂构造进行了成矿有利统计分析,结果显示有 57.67%的已知矿体位于断裂构造内,将断裂构造作为成矿的有利因子。并根据三维成矿有利信息提取统计分析结果,确定了连续插值区域内的量化预测模型,如表 4 所示。

对于通过连续插值建立的矿区区域的成矿靶

表 1 主要实物工作量一览表
Table 1 List of main physical workload

序号	工作项目	单位	工作量
1	人工重砂	件	19
2	光薄片鉴定(详细)	件	47
3	电子探针分析、扫描电镜分析	点	545
4	硅酸盐全分析、微量元素、 稀土元素分析	件	53
5	Sr、Nd、Pb 同位素测试	件	36
6	包裹体镜下鉴定	点	21
7	单矿物测年	点	150

表 2 西峪研究区原始资料收集清单
Table 2 Collection list of original data in Xiyu study area

资料名称	比例尺	数量	探测深度/m
地形地质图	1: 2 000, 1: 10 000	2	地表
勘探剖面	1: 1 000	63	250 ~ 1 050
钻孔编录数据		200	39 ~ 1 027
中段地质平面图	1: 1 000	7	30 ~ 450

区圈定本次主要是利用三维信息量的方法。该方法广泛应用于区域矿产预测，其以地质异常理论为指导，以地质、物探、化探、遥感、矿产分布等找矿信息为基础，通过统计途径计算各地质因素、找矿标志所提供的找矿信息量，定量地评价控矿地质

因素和找矿标志对指示找矿作用的大小，确定有利成矿部位(赵鹏大等, 1983)。按照信息量方法的基本思路，需要依据信息量的计算结果对信息量数据进行进一步的统计分析，确定出信息量的临界值，最终得到成矿有利的块体单元进行找矿靶区圈定。

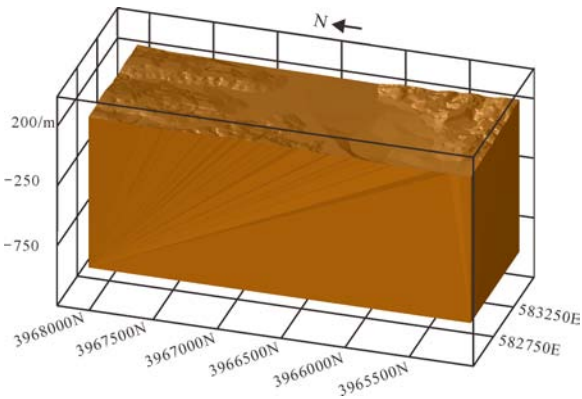


图 2 西峪矿区外围地表三维实体模型
Fig. 2 3D solid model of peripheral surface in Xiyu mining area

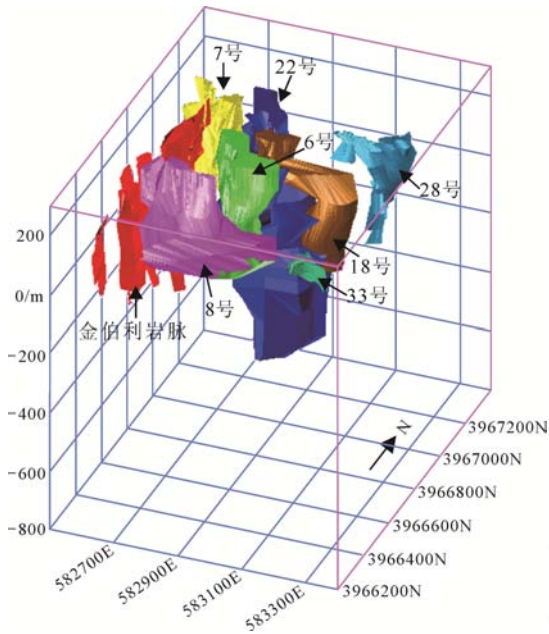


图 3 西峪矿区金刚石矿体三维实体模型
Fig. 3 3D solid model of diamond ore body in Xiyu mining area

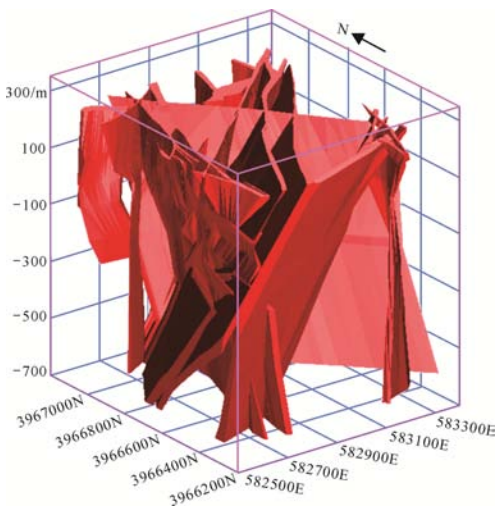


图 4 西峪矿区断裂三维实体模型
Fig. 4 3D solid model of mining area fracture in Xiyu

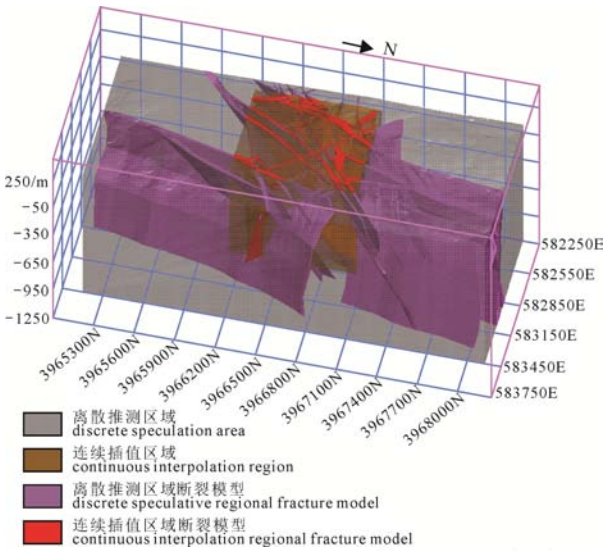


图 5 西峪矿区外围断裂三维实体模型
Fig. 5 3D solid model of peripheral fracture in mining area in Xiyu

表 3 西峪研究区地质找矿模型
Table 3 Geological prospecting model of the study area in Xiyu

控矿要素	特征描述	变量类型	矿化异常三维空间重构
构造条件	构造含矿特征	有利成矿构造	构造含矿性分析
	构造展布特征分析	构造发育分析	构造等密度
			构造频数
			主干构造
	构造带特征	构造方位分析	构造方位异常度
		构造影响区域	构造异常方位
构造导矿容矿特征	构造带特征	断裂交汇部位	断裂缓冲区
		构造中心对称度	断裂交点数
	构造导矿容矿特征	构造中心对称度	中心对称度

本次研究首先针对不同的异常信息进行了信息量计算(表 5), 可以发现除了断裂本身信息外, 构造等密度, 构造中心对称度及构造交点数等三维空间重构异常特征信息信息量也比较高, 与成矿的相关度高。

将所有块体的信息量值进行分级统计, 对各个信息量区间与已知金伯利岩块体进行叠加统计分析。本次将信息量划分成了 11 个区间, 统计了每个区间内所含模型块数、含矿单元块数, 进而分别计算出累积块比和累积矿比、累积矿块比/累积块数比

(表 6), 最终根据信息量大于 2.7 的区域并结合信息量大于 2.1 和信息量大于 2.4 的块体区域圈定了两个找矿靶区(图 6)。通过非线性的自相似离散推测方法直接利用西峪矿区连续插值区域内的地质实体根据其具有的自相似性特征对矿区外围进行推测建模, 通过三维空间重构, 利用连续插值区域所得到的预测模型来指导离散区域的有利成矿信息选择, 并通过分形的维度分析来确定出最佳的有利成矿条件组合及其距离范围, 从而圈定出成矿远景区。

表 4 连续插值区域定量化预测模型
Table 4 Quantitative prediction model of continuous interpolation region

控矿要素	异常空间重构信息	重构异常定量化区间
构造条件	断裂构造	断裂构造
	等密度	(2.187 ~ 4.730)
	频数	(2.660 ~ 4.540)
	主干断裂	(0.484 ~ 1.418)
	方位异常度	(0.020 ~ 0.190)
	断裂缓冲区	断裂 40 m 缓冲区
	断裂交点数	(0 ~ 1.514)
	中心对称度	(0 ~ 0.119)
		(0 ~ 0.010)
	异常方位	(0.126 ~ 0.204)
		(0.311 ~ 0.514)

表 5 成矿有利信息三维信息量
Table 5 Three dimensional information volume of favorable mineralization information

信息层名	含标志单元数	信息层单元数	信息量
断裂	28 357	146 648	0.452
断裂 40 m 缓冲区	44 803	329 291	0.299
等密度	30 431	143 819	0.491
异常方位	28 438	277 124	0.177
中心对称度	8 770	45 756	0.448
交点数	8 903	39 074	0.523
频数	29 991	337 514	0.114
方位异常度	30 074	239 641	0.264
主干断裂	32 633	203 347	0.371

表 6 三维信息量分区统计分析表
Table 6 Statistics and analysis of 3D information volume zoning

信息量范围	累积块数	累积矿块	累积块数比	累积矿块比	累积矿块比/累积块数比
>0	580 529	49 369	0.843	0.989	1.173
>0.3	388 930	48 112	0.565	0.964	1.707
>0.6	297 431	46 388	0.432	0.929	2.152
>0.9	237 497	43 357	0.345	0.868	2.518
>1.2	183 101	38 402	0.266	0.769	2.893
>1.5	130 806	30 290	0.190	0.607	3.194
>1.8	72 436	18 152	0.105	0.364	3.457
>2.1	37 927	10 094	0.055	0.202	3.671
>2.4	16 540	4 410	0.024	0.088	3.678
>2.7	2 306	618	0.003	0.012	3.697
>3	703	130	0.001	0.003	2.551

基于非线性的推测模型方法确定出该研究区内控矿要素的最佳组合数为 9 个, 最佳距离数为 9 个控矿要素组合下 2 倍窗体的长度(20 m)。根据成矿有利块体的分布, 建立了 6 个找矿远景区, 并根据远景区内有利块体数目将靶区分成 A, B, C 三个等级, 将远景区内有利块体数大于 30 000 的区域定为 A 级, 将有利块体数在 15 000~30 000 区间内的远景区定为 B 级, 剩下的定义为 C 级靶区(图 7)。

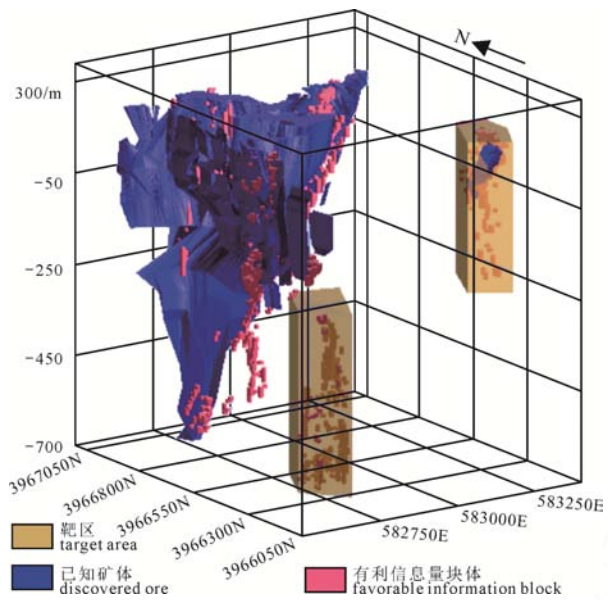


图 6 西峪矿区找矿靶区空间位置图
Fig. 6 Spatial location of prospecting target area in Xiyu

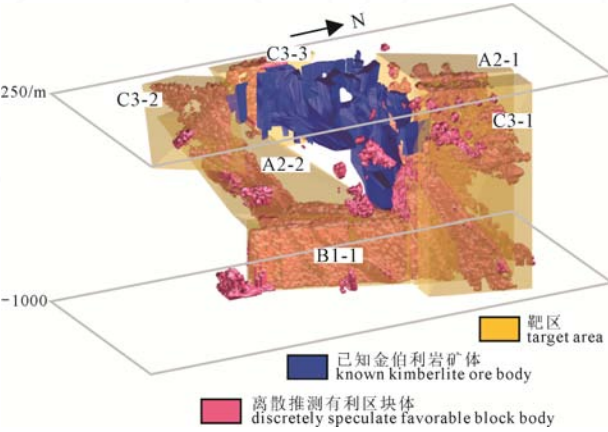


图 7 西峪矿区外围离散推测区域远景区圈图
Fig. 7 Prospective area map of discrete speculation area around the mining area in Xiyu

2.3 成矿预测评价

找矿概率评价是三维成矿预测(“定位-定量-定概率”)的重要内容, 主要是对整个成矿预测研究可信度的表征, 用以衡量预测结果对于后续开展勘探工作的可信度(陈建平等, 2014)。定位是依照成矿有利异常信息的分布得到成矿的有利部位; 定量则是通过定位预测中的预测范围并结合其已知矿体的品位, 形态等特征对其深部及外围的资源潜力进行评估; 定概率是根据计算分析结果, 对实际的预测结果进行概率评估, 分析其靶区内含矿的可能性大小。

在实际的成矿预测工作中由于资料精度和全面性的参差, 研究技术方法的科学可靠程度等因素会对预测结果造成一定的影响, 因此需要对成矿预测工作进行概率评价。本研究是基于专家打分加权法对预测工作进行概率评价, 主要对于研究的数据资料, 工作程度, 预测单元和找矿地质模型进行了一定的评估考量。

专家打分权重法的计算公式为:

$$P = W_i \times V_i$$

其中, P 为找矿概率的综合值, W_i 为评价要素因子 i 的权重值, V_i 为评价要素因子 i 的打分赋值。此外基于本次对于连续插值模型与离散推测模型两者的数据精度不一致, 分别对两个区域进行找矿概率评价。对研究区内预测精度进行评价计算可以得到连续插值区域的找矿概率值为 57%, 离散推测找矿概率值为 48%(表 7)。虽然研究区的资料精度较高, 但研究工作所用到的资料数据类型相对较少, 故预测评价工作存在一定的风险, 但是总体来说预测结果置信度高, 可以在该区进行找矿勘查实践。

3 结论

蒙阴作为金刚石原生矿重要成矿区, 其深部金刚石找矿潜力巨大, 通过详细的野外地质调查, 结合地质大数据基础数据整合及分析, 提出隐伏金刚石矿勘查指标体系, 建立了基于时间和空间的面向地质结构-属性耦合表达的统一空间数据模型以及知识驱动与数据驱动协同的地质大数据集成建模技术体系。

表 7 评价因子赋值及权重表
Table 7 Evaluation factor assignment and weight table

类型	连续插值预测		离散推测预测	
评价因子	赋值(V_i)	权重(W_i)	赋值(V_i)	权重(W_i)
资料基础	0.6	0.25	0.4	0.25
工作程度	0.6	0.20	0.4	0.20
预测单元	0.6	0.25	0.6	0.25
找矿模型	0.5	0.30	0.5	0.30
找矿概率	0.57		0.48	

通过研究隐伏金刚石矿成矿模式和找矿技术方法,开展信息提取、三维实体地质建模、三维可视化成矿预测,提出隐伏金刚石矿勘查的指标体系。建立金刚石成矿数据库,利用连续插值法建立西峪矿区、矿区外围地表、矿体实体模型和断裂实体模型。并根据三维成矿有利信息提取统计分析结果,确定了连续插值区域内的定量化预测模型,利用三维信息量法圈定找矿靶区2处、利用非线性的自相似离散推测法圈定找矿靶区6处。最后对预测靶区进行找矿概率评价,连续插值区域的找矿概率值为57%,离散推测找矿概率值为48%。本研究为蒙阴金刚石地质大数据整理及原生矿深部找矿新突破提供重要的理论支撑。

Acknowledgements:

This study was supported by Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources (No. KY202212).

参考文献:

- 陈建平, 于萍萍, 史蕊, 于森, 张顺昌. 2014. 区域隐伏矿体三维定量预测评价方法研究[J]. 地学前缘, 21(5): 211-220.
- 陈建平, 李靖, 谢帅, 刘静, 胡彬. 2017. 中国地质大数据研究现状[J]. 地质学刊, 41(3): 353-366.
- 陈麒玉, 刘刚, 何珍文, 张夏林, 吴冲龙. 2020. 面向地质大数据的结构-属性一体化三维地质建模技术现状与展望[J]. 地质科技通报, 39(4): 51-58.
- 刘利宝, 吕新彪, 王巍巍, 曹新志. 2019. 成矿信息精细化研究的意义及有效途径[J]. 大地构造与成矿学, 43(2): 283-291.
- 滕艳, 张地珂. 2013. 大数据时代需重视数字地质研究[N]. 中国国土资源报, 2013-03-14(006) [2022-03-05].
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 陈郑辉, 沈保丰, 汤中立, 裴荣富. 2011. 成矿体系的研究进展及其在成矿预测中的应用[J]. 地球学, 32(4): 385-395.
- 吴成平, 石睿, 邓茂盛. 2016. 浅议我国金刚石原生矿分布概况及找矿方法[J]. 西部资源, (6): 58-61.
- 向杰, 肖克炎, 陈建平, 李诗. 2020. 基于成矿系统的三维定量预测研究——以四川拉拉铜矿为例[J]. 地球学报, 41(2): 135-143.
- 肖克炎, 孙莉, 阴江宁, 丁建华, 牛翠祎, 陈建平, 杨毅恒. 2014. 全国重要矿产预测评价[J]. 地球学报, 35(5): 543-551.
- 周永章, 黎培兴, 王树功, 肖凡, 李景哲, 高乐. 2017. 矿床大数据及智能矿床模型研究背景与进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(2): 327-331.
- 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. 1983. 矿床统计预测的理论与实践[J]. 地球科学, (4): 107-121.
- 赵文津. 2003. 岩石圈深部探测与青藏高原研究[J]. 中国工程科学, 5(2): 1-15.
- 翟裕生. 1999. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 6(1): 14-28.

References:

- CHEN Jian-ping, YU Ping-ping, SHI Rui, YU Miao, ZHANG Shun-chang. 2014. Research on three-dimensional quantitative prediction and evaluation methods of regional concealed ore bodies[J]. Earth Science Frontiers, 21(5): 211-220(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jian-ping, LI Jing, XIE Shuai, LIU Jing, HU Bin. 2017. China geological big data research status[J]. Journal of Geology, 41(3): 353-366(in Chinese with English abstract).
- CHEN Qi-yu, LIU Gang, HE Zhen-wen, ZHANG Xia-lin, WU Chong-long. 2020. Current situation and prospect of structure-attribute integrated 3D geological modeling technology for geological big data[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 39(4): 51-58(in Chinese with English abstract).
- LIU Li-bao, LÜ Xin-biao, WANG Wei-wei, CAO Xin-zhi. 2019. Significance of mineralization information refinement and effective approaches[J]. Geotectonica et Metallogenia, 43(02): 283-291(in Chinese with English abstract).
- TENG Yan, ZHANG Di-ke. 2013. Digital geology research needs attention in the era of big data[N]. China Land and Resources News, 2013-03-14(006) [2022-03-05](in Chinese).
- WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, XU Zhi-gang, CHEN Zheng-hui, SHEN Bao-feng, TANG Zhong-li, PEI Rong-fu. 2011. Advance in the study of mineralization system and its application to assessment of mineral resources[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(4): 385-395(in Chinese with English abstract).
- WU Cheng-ping, SHI Rui, DENG Mao-sheng. 2016. Brief Discussion on the Distribution and Prospecting Methods of China's Primary Diamond Deposits[J]. Western Resources, (6): 58-61(in Chinese).
- XIANG Jie, XIAO Ke-yan, CHEN Jian-ping, LI Shi. 2020. 3D metallogenic prediction based on metallogenic system analysis: A case study in the Lala copper mine of Sichuan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 135-143(in Chinese with English abstract).
- XIAO Ke-yan, SUN Li, YIN Jiang-ning, DING Jian-hua, NIU Cui-yi, CHEN Jian-ping, YANG Yi-heng. 2014. Prediction and assessment of important mineral resources in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 35(5): 543-551(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yong-zhang, LI Pei-xing, WANG Shu-gong, XIAO Fan, LI Jing-zhe, GAO Le. 2017. Research progress on big data and intelligent modelling of mineral deposits[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 36(2): 327-331(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Peng-da, HU Wang-Liang, LI Zi-jin. 1983. The theory and practices of statistical prediction for mineral deposits[J]. Earth Science, (4): 107-121(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Wen-jin. 2003. Deep exploration for lithosphere with special reference to Qinghai-Tibet Plateau[J]. Strategic Study of CAE, 5(2): 1-15(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Yu-sheng. 1999. On the Metallogenic System[J]. Earth Science Frontier, 6(1): 14-28(in Chinese with English abstract).