文章编号: 0258-7106 (2024) 04-0802-19

Doi: 10. 16111/j. 0258-7106. 2024. 04. 005

山东蒙阴金刚石矿床地质大数据三维建模与成矿预测*

陈建平^{1,2},周冠云^{1,2**},褚志远^{3,4},赵 婕⁵

(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,山东临沂 276600;4山东省地矿局金刚石成矿机理与探测重点实验室,山东临沂 276600;
 5琼台师范学院,海南海口 571127)

摘 要 大数据时代的到来,需要我们在大数据思维指导下进行三维地质建模工作。笔者以山东蒙阴西峪金 刚石矿作为为研究对象,基于大数据发现技术与大数据挖掘技术实现了传统三维地质建模工作和信息技术的深度 融合,结合可视化表达等技术方法充分提取了文本数据中西峪金刚石矿的成因模式信息与地球物理勘探标准信 息;并在此指导下完成了地球物理信息的解译工作,以期降低地球物理信息多解性对三维地质建模干扰,提高三维 地质建模的准确性。最后,结合对成因模式与地球物理勘探标准的深入认识,文章实现了蒙阴金刚石深部含矿性 分析,并初步圈定了成矿远景区。

关键词 大数据发现;大数据挖掘;三维地质建模;蒙阴西峪金刚石矿中图分类号:P619.241文献标志码:A

Geological big data three-dimensional modelling and mineralization prediction of diamond deposit in Mengyin, Shandong, China

CHEN JianPing^{1, 2}, ZHOU GuanYun^{1, 2}, CHU ZhiYuan^{3, 4} and ZHAO Jie⁵

(1 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2 Beijing Key Laboratory of Land and Resources Information Research and Development, Beijing 100083, China; 3 The 7th Institute of Geology and Mineral Exploration of Shandong Province, Linyi 276600, Shandong, China; 4 Key Laboratory Metallogenic Mechanism and Exploration of Diamonds in Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Linyi 276600, Shandong, China; 5 Qiongtai Normal University, Haikou 571127, Hainan, China)

Abstract

The arrival of the big data era requires us to carry out three-dimensional (3D) geological modeling work under the guidance of a big data mindset. This research takes the Xiyu diamond deposit in Mengyin, Shandong Province, as the research object and achieves the deep integration of traditional 3D geological modeling work and information technology based on big data discovery technology and big data mining technology. In this research, the genetic type information and geophysical exploration criteria information of Xiyu diamond deposit in the text data is fully extracted through data discovery, data mining, and visible expression. The interpretation of geophysical information is completed under the guidance of data discovery and data mining to reduce multi-interpretations of the interference of geophysical information on the 3D geological modeling and improve the accuracy of the 3D geological modeling. Finally, combining the in-depth understanding of the genetic type and the geophysical explo-

^{*} 本文得到透视山东-数据更新与模块研发集成专题研究项目(编号:KY202407)和蒙阴地区金刚石原生矿三维地质模型分析与深部靶 区预测项目(编号:KY202102)联合资助

第一作者简介 陈建平,男,1959年生,博士,教授,主要从事遥感与矿产资源成矿预测工作。Email: 3s@cugb.edu.cn

^{**} 通讯作者 周冠云,男,1996年生,博士研究生,主要从事地质大数据及成矿预测研究。Email: zhou553908246@163.com 收稿日期 2024-01-12;改回日期 2024-06-20。赵海杰编辑。

ration criteria, the analysis of deep mineralization has been realized, and the mineralization targets have been preliminarily defined.

Key words: big data discovery, big data mining, 3D geological modeling, Mengyin-xiyu diamond deposit

21世纪初,大数据科学成为新的科学范式,地 质学逐渐进入大数据时代,大数据时代的数字地质 是发展数学地质的新平台(Chen et al., 2016)。许 多学者尝试将大数据的方法引入地球科学领域的 相关研究中。目前,地质大数据技术的研究和应用 已经在许多与地球科学相关的领域内取得了突破, 例如地质灾害监测(Martínez-Álvarez et al., 2019)、 地球科学大数据平台建设(Baumann et al., 2016)、 土地资源管理(Zang et al., 2015)、油气资源勘探与 评价(Yu et al., 2014)、地球内部结构研究(Zhang et al., 2016)等。

通常传统的地质数据大多是二维的(地质图、 剖面、中段剖面图等),但地质过程往往是在三维 空间中发生的(Porwal et al., 2015)。为了弥补这 种差距,加拿大学者Simon WH在2012年提出了三 维地质建模(Simon, 2012),Houlding BS 又为地质 建模扩展了多种基础技术方法(Houlding et al., 1998)。此后,许多学者使用三维地质建模来表示 特定的成矿过程(陈建平等, 2007; 2014; Mao et al., 2016),可见,三维地质建模已成为地质数据整 合与管理的重要方法手段。在大数据时代,如何 获取地质大数据、如何科学利用地质大数据、如何 在大数据思维指导进行三维建模相关工作,是笔 者需要探讨的新问题。

深部找矿往往没有实际地质工作提供的第一 手资料支持,只能通过各种勘探手段来对深部情况进行推测。地球物理勘探就是其中较为有效的 方法。然而地球物理信息往往具有多解性的特 点,想要准确解译出地球物理信息,就必须考虑如 何消除多解性的影响。由于地质学的特殊性,地 质上大多数的前人研究成果集中在文本资料中。 传统的解译工作仅仅依靠专家知识,并未对地质 文本内包含的海量信息进行充分整合利用。文章 通过大数据文本挖掘得到西峪金刚石矿成因模式 与地球物理勘探标准,两者相互结合作为理论依 据共同开展蒙阴西峪矿区深部地球物理信息解译 工作,以期在充分利用地质文本数据的基础上,降 低深部地球物理信息的多解性。随后,基于解译 工作实现对研究区的地质-地球物理建模,整合研 究区地球物理数据。最后对得到的地球物理模型 含矿性展开分析,实现初步成矿预测。本研究具体 流程步骤如图1所示。

1 大数据技术方法

1.1 大数据发现技术

文章在明确构建深部地质-地球物理模型来指 导找矿的前提下,结合大数据关键技术及新理念,运 用地质矿产大数据发现关键技术,实现了对于金刚 石矿相关大数据资料的发现。应用Python和C#语 言发现和获取公域网相关数据;在大数据发现过程 中针对矿产专家知识节点以及地质叙词表展开并建 立逻辑结构树,依据逻辑结构树并运用爬虫相关技 术获取相关的地质文献资料。地学知识关联体系是 一个系统化的过程,又可以叫做逻辑结构树,它是由 地学词汇以及词汇之间的关联组成的(Wang et al., 2018)。基于逻辑结构树可以辅助锁定更多的相关 词汇,例如对输入词"金伯利岩型金刚石矿"进行查 询,可以从逻辑结构树中获取上位词(BT)、下位词 (NT)、相关词(RT)和英文词(VT),检索词汇从1个 扩展到4个(图2)。

首先,笔者利用收集的与地球科学相关的网址 库,用逻辑结构树作为导航,选取了与金刚石矿床相 关的开放数据库与涉及金刚石相关研究的网址,作 为网页爬虫的目标网址(图3)。然后,笔者将提取的 与蒙阴金刚石矿床相关的叙词如金伯利岩、金刚石 矿床、中心火山式、斑状金伯利岩等作为关键词在目 标网址内检索,并获取相关的文本内容。最后,进行 相关词、同义词、上位词、下位词的搜索,扩大检索的 范围,务求充分发现与蒙阴金刚石矿床成矿相关的 数据。该套技术方法使得构建的矿产数据库具有区 域性、全面性、专业性的特点。

文章以"蒙阴金刚石矿床"为大数据发现目标, 按照数据来源,运用爬虫技术共获取了包括各国地 调局、大型出版商或专业期刊中的文本数据112 56 条。用这112 56条文本数据,构成大数据文本库,详 细如下表1。该文本库按照地质要素划分为6种类 型,其中有些文本数据可归属于多种类别,所以6种



图1 研究思路与技术路线

Fig. 1 Research ideas and technical routes





类别的总和大于总文本数据量。

1.2 大数据文本挖掘技术

大数据文本信息利用的关键是对文本信息进行 分类,以便于后续的信息提取与利用。本文提出了 一种利用基于 CNN(Convolutional Neural Networks) 的对大数据文本进行分类的工作流程(Li et al., 2018;2021)。本研究运用该方法对获取到的海量地 质文本数据进行分类,然后开展以下 3 个方面的工 作:① 对所有文本数据中的实义词进行常规词频统 计,绘制词云图;② 对分类后的文本数据进行 TF-IDF(Term frequency-inverse document frequency)统 计;③ 对实义词之间的复杂的关系,例如包含关系、 前后关系、并列关系等,统一进行提取并构建知识 图谱,绘制弦图。词云图显示的常规词频统计高频词,简洁地表达了文献中包含的高频实义词信息,使笔者能够简单、清楚地读取此地学文献中的 找矿信息。文本数据中包含的高价值信息,也与 一些信息量大但频率低的词汇有关(Piantadosi et al., 2014)。TF-IDF(词频-逆向文件频率)是一种提 取低频但信息量大的词语的方法(Liu et al., 2022),用来评估一个词对于特定一份文件的重要 程度。其中TF是词频,一个文件中某个词出现的 频率,IDF是逆向文件频率。而知识图谱作为具有 "有向图结构"的语义网络,通过可视化的图谱形 象地展示了文本数据的整体知识架构,从而揭示 其内藏的规律。





2 大数据可视化分析

本研究主要对与深部地球物理信息的解译、深 部三维地质特征模型构建最相关的"成因类型"、"地

表1 大数据发现的文本类别统计表 Table 1 Statistical table of text categories discovered by big data technologies

类别	学术期刊	学位论文	报告	会议	新闻
成矿地质背景	4537	112	5	24	7
成矿时代	2137	12	2	44	0
成因类型	2378	45	1	26	0
矿化类型	1327	9	3	136	2
地质勘探标准	8796	134	3	98	8
地球物理勘探标准	1675	2	1	12	1

球物理勘探标准"进行了可视化分析。首先,文章将 从公域网上获得的学术文献、新闻资讯、项目报告 等相关文本语料,与局域网上获取到的蒙阴研究区 勘查报告、区调报告等分级存储在文本数据库中; 其次,对数据清洗,去除掉空、假以及重复数据,形 成语料库;最后,通过对实义词进行深度的高频词 统计、TF-IDF统计、共现矩阵统计等提取出关键节 点与前后关系,通过词云、知识图谱等梳理展现其 中关键找矿信息与关联。笔者通过对于文本挖掘 结果的解析,找到了对于金刚石矿床的新的认识, 构建了基于大数据可视化分析结果的地球物理特 征提取方案。大数据可视化分析为地球物理信息 的解译、深部三维地质特征模型的构建提供了地质 依据。

2.1 成因类型

蒙阴地区金伯利岩浆主要以岩管的形式上侵, 目前已经遭受严重的剥蚀,仅仅残余火山根部相与



图4 蒙阴金刚石矿成因类型词云图

Fig. 4 The word cloud diagram of the diamond deposit genetic type in the Mengyin area





火山颈相的底部(张建太等,2020)。如图4显示,岩管在相关文本数据中出现的频次最高,且远大于其他词。图5中大部分词与断裂相关,表明断裂与成矿作用相关。NNE向断裂为矿区主要的导矿构造,而NW向断裂为赋矿的重要构造,这使得岩浆在NW方向上有着一定的分布,岩管截面多为椭圆状且长轴为NW向。

Mitchell 建立了金伯利岩型金刚石的原生矿 矿床模式(Mitchell, 1986),指出一个完整的金伯 利岩岩筒从上到下包括火山口相、火山道相和根 部相(带),蒙阴地区基本可适用于这种机制(图 6)。关于蒙阴金伯利岩的成因模式,目前主流的 说法为中心火山式喷发,通过弦图(图7),笔者可 以发现,蒙阴地区金刚石矿主流观点认为的成因 类型应为中心火山式喷发;但近年来,结合新的地 质证据发现,也有不同的观点,如向璐等(2020)认 为中国华北与华南的金伯利岩浆存在多期呈蘑菇 式侵入的情形。张成基等(2020)则在厘定了不同 类型金伯利岩形成次序的基础上,提出了潜火山 式这种新的成因模式。如图4与图5所示,潜火山 式虽然出现频率不高,但是具有较高的区分度,是 近年来关于成因模式的新观点。

蒙阴金刚石从常马庄到坡里含矿性逐渐降低, 总体上符合中心火山式成因模式。但在单一矿区由 于多期侵入、构造裂隙发育好等特点,可能存在沿离 岩管不远的裂隙分布的金伯利岩。

2.2 地球物理勘探标准

针对金刚石矿床勘探,目前所采用的地球物理



图 6 理想化的金伯利岩岩浆系统及其相带(改自 Mitchell, 1986)

Fig. 6 The idealised kimberlite magma systems and its facies (modified from Mitchell, 1986)

勘探方法有很多,在区域尺度上多用航磁勘探与重 力勘探,一般来说,金刚石多赋存于重低磁高区(张 建太等,2020);而在矿区尺度上,常常与电法、磁法、 震法等多种方法并用(图8)。

从词云图(图8)笔者可以清楚地看到磁法勘 探、电法勘探均是金刚石矿勘探中常用的方法,不 过金刚石本身不具有好的地球物理特征,很难根据 其地球物理特征将其单独鉴别出来,故笔者一般运 用地球物理方法寻找金刚石的寄主岩石,即金伯 利岩。

图9显示蒙阴地区低值异常与低阻异常拥有极高的区分度,从小侧面反映出了蒙阴地区进行的实际勘探工作所揭示的规律。电法勘探表明,蒙阴矿区的金伯利岩多表现为低阻异常,这一点在弦图

(图10)中也可以清楚的呈现。金伯利岩与电阻异 常、低阻异常联系密切且在等值线图上常常表现为 "U"型异常与"V"型异常。与此同时,断裂或者与 断裂相关的破碎带也常常在电法勘探中表现为 "U"型异常或"V"型异常。由此,笔者认识到在电 法勘探中"U"型异常与"V"型异常可以作为提取金 伯利岩岩体的条件,但要注意排除断裂或者破碎带 的干扰。

在磁法勘探中,由于金伯利岩磁性与围岩磁性 大小关系不确定,其有时表现为高磁异常;有时表现 为低磁异常,故只要是有磁异常,不管是正异常还是 负异常,均可列为金伯利岩可能存在的区域,但这当 中存在着诸多多解性。可见,金刚石勘探中磁异常 很难单独解释,必须与其他勘探方法相结合,或有实 际野外地质工作的支持。

3 地质-地球物理建模

3.1 研究区地质背景

山东蒙阴地区金刚石矿产于中国华北克拉通的 东南部,具体位于鲁西地台中部,郑庐断裂西南侧。 蒙阴地区金刚石主要有常马庄、西峪、坡里3个矿 区,主要的控矿断裂为金星头断裂、蔡庄断裂、新泰-垛庄断裂、上五井断裂以及蒙山断裂(图11)。

西峪金伯利岩带位于蔡庄断裂、新泰-垛庄断裂 与上五井断裂相互切割、交汇部位(李伟等,2021) (图11)。NNE向张性或张扭性的断裂为主要的导 矿构造;次级构造为NW向压扭性构造(图12),是重 要的容矿构造。岩管的主要岩性为粗晶金云母金伯 利岩,岩管四周的围岩既有灰岩又有片麻岩(张培 强,2006)。

3.2 剖面解译

本次研究在蒙阴西峪地区开展了大地电磁测深 (MT)工作,测区内用于大地电磁测深的设备为加拿 大凤凰公司的V8电法工作站。观测的是频率为 10⁻⁴Hz~10⁻³Hz的近似平面波的天然电磁场。野外 工作采用了十字型(a)、L型(b)或T型(c)装置坐标 系统为定义沿测线方向为X方向,垂直测线方向为 Y方向。在野外工作中保持水平方向的两对电极 (Ex,Ey)必须正交,水平磁传感器(Hx,Hy)与对应的 电场(Ey,Ex)分别互相正交,各正交量水平方位偏差 不大于1°。室内资料整理用的是加拿大凤凰公司配 套的SSMT2000软件和意大利GEOSYSTEM公司的



图 8 蒙阴金刚石矿地球物理勘探标准词云图 Fig. 8 The word cloud diagram of the diamond deposit geophysical exploration criteria in the Mengyin area

WINGLINK软件,所测得资料的反演深度为4000m, 最终得到西峪矿区4幅深达4000m的电阻率等值

线图。

勘探线布置如下图(图13),据实际野外工作成



图9 蒙阴金刚石矿地球物理勘探标准TF-IDF图



果可知,其中由测线1得到的C1剖面距离深部主岩 管最近,由测线2、测线3得到的C2与C3剖面逐渐 接近矿区外围,由测线4得到的C4剖面是距离主岩 管最远的一条剖面。

3.2.1 C1剖面解译

结合通过大数据挖掘得到的大数据可视化分析 结果,笔者将重点关注电阻率剖面中的"U"型异常 与"V"型异常。C1剖面作为最靠近主岩管的剖面, 有着最显著的"U"型、"V"型电阻异常,在整个图(图 14)的中间部分从上到下呈大范围低阻异常,考虑到 该地区岩层以太古代花岗岩基底和古生代沉积岩为 主,不存在陡立的地层,基本可以排除是地层导致的 深贯4000 m的"U"型低阻异常,只可能是大型破碎 带或者金伯利岩管。实际的野外地质勘探成果显 示,主岩管中心在C1剖面中部稍南的地方;根据成 因类型——中心火山式喷发,也可知浅部的火山颈 相的多个岩管会最终收缩为火山根部相的一根岩 管。研究区过去的震法的勘探的工作基本确定C1





Fig. 10 Chord diagram of the diamond deposit geophysical exploration criteria in the Mengyin area





Fig. 11 Distribution of kimberlite belts in the Mengyin area (modified from Li et al., 2020)



图 12 山东西峪金刚石矿床地质简图(据李伟等,2020修改) Fig. 12 Geological sketch map of Xiyu diamond deposit, Shandong Province, China (modified from Li et al., 2020)

测线切过岩管且岩管两侧存在2条深大断裂(程光 锁等,2020)。 综上,基本可以确定中间的大段低阻"U"型异常 与"V"型异常为金伯利岩管及其影响的区域。需要注 意的是,破碎带与岩管并不是严格互斥的,因为岩管 本身就是沿着断裂上侵,这里解译为岩管并不意味着 不存在破碎带,只是岩管赋存在破碎带里,且整个破 碎带都受到金伯利岩管影响。金伯利岩顺着断裂上 侵,在上侵过程中不可避免地改造断裂,使得断裂被 扩大且岩管周围的岩石破碎。区域上,受金伯利岩管 影响的整个破碎带可以称之为金伯利岩管影响区。

金伯利岩管两侧由于断裂的存在,会使得电阻 梯度变大,故将岩管两侧电阻率梯度变化最大的部 分解译为2条断裂,如图14中的F1与F2。而剖面左 侧并不连续的低阻"U"型异常,很可能是因为断裂 导致的,选取主岩管左侧"U"型异常的电阻率等值 线转折端,将其从上到下依次连接,得到断裂F3(图 14)。在剖面浅部,电阻率变化并不大,这是由于 500m以浅常常受到风化作用影响,由于富含水分常 常使得电阻率偏低,所以将浅部电阻率梯度小的部 分归为风化影响层。

3.2.2 C2剖面解译

C2剖面中没有与C1剖面类似的纵贯深部的低 阻异常区(图15),说明该剖面已经在深部开始远离 主岩管。但是在浅部仍然有着较好的低阻异常区。 根据对成因类型的文本分析结果可知,由于浅部是





Fig. 13 Layout of exploration lines for geomagnetic bathymetry work



图 14 大地电阻率C1 剖面等值线断面解译图 1—风化影响层界线;2—解译金伯利岩管;3—解译断裂;4—断裂编号 Fig. 14 Geodetic resistivity C1 contour cross-section interpretation graph 1—Boundary of weathering influence layer; 2—Interpreted kimberley rock pipes; 3—Interpreted faults; 4—Faults numbers

金伯利岩火山根部相向火山颈相转变的地带,金伯利岩浆影响范围逐渐扩大,且在1800测点处U型异

常内有着金刚矿的分布,所以将浅部的"U"型异常的低阻区解译为金伯利岩管影响区(浅部含金伯利

岩管的破碎带)(图15)。

由于该区域内的金伯利岩浆的导矿构造是连续的NNE向断裂,所以浅部"U"型电异常区内,电阻率梯度变化大的范围,可能为断裂,且在深部也能找到 其对应的"U"型异常区。所以解译出2条深断裂F4 与F5(图15)。

金伯利岩浆为多期侵入,常常有先导岩墙(图 6)。C2剖面在深部1500~3000 m处有大面积的低 阻区,比周围电阻明显要低,很有可能是金伯利岩 浆系统中的岩墙或根部膨大带,其不呈现"U"型的



图15 大地电阻率C2剖面等值线断面解译图

1一解译岩墙;2一风化影响层界线;3一解译浅部岩管影响区;4一解译断裂;5一断裂编号

Fig. 15 Geodetic resistivity C2 contour cross-section interpretation graph

1-Interpreted dike; 2-Boundary of weathering influence layer; 3-Interpreted shallow rock pipe influence area; 4-Interpreted fracture;

5-Faults numbers

电阻异常,所以是岩墙的可能性较之根部膨大带的 可能性较大,故将其解译为岩墙。C2 剖面浅部电 阻梯度仍然较小,这是风化作用影响的结果,选取 电阻率梯度开始明显变大的地方,将其解译为风化 影响层界线。

3.2.3 C3剖面解译

C3 剖面同样在中间有着一个纵贯剖面的低阻 区(图16),但这个呈现"V"型异常的低阻区较之C1



图16 大地电阻率C3剖面等值线断面解译图

1一解译岩墙;2一风化影响层界线;3一解译浅部岩管影响区;4一解译断裂;5一断裂编号;6一解译深部破碎带

Fig. 16 Geodetic resistivity C3 contour cross-section interpretation graph

1-Interpreted dike; 2-Boundary of weathering influence layer; 3-Interpreted shallow rock pipe influence area; 4-Interpreted fracture; 5-Faults

numbers; 6-Interpreted deep crushed zone

中的"U"型低阻区范围较小,且中间有间断,又因为 此处远离主岩管,故这个低阻区为破碎带的可能性 较大。但浅部"U"型异常区周围靠近2000测点的地 方,有金刚石矿体出现;又兼之浅部为金伯利岩浆影 响范围扩大的火山颈相。所以本研究将此破碎带分 开解译,分为浅部的岩管影响区(含金伯利岩管的破 碎带),和深部的破碎带。该剖面显示(图16),在地 下1500 m 处有一个相对较大的低阻异常区,这个



图17 大地电阻率C4剖面等值线断面解译图 1一风化影响层界线;2一解译浅部岩管影响区;3一解译断裂;4一断裂编号

Fig. 17 Geodetic resistivity C4 contour cross-section interpretation graph

1-Boundary of weathering influence layer; 2-Interpreted shallow rock pipe influence area; 3-Interpreted fracture; 4-Faults numbers

低阻异常区可能是C2 剖面中解译出的岩墙的 延伸。

同样的笔者将该剖面中解译出的破碎带周围, 且电阻梯度变化大的区域,解译为断裂F6与F7;将 500m深处电阻率梯度开始明显变大的带解译为风 化影响层界线(图16)

3.2.4 C4剖面解译

C4 剖面(图17)离矿区核心最远,在该剖面左侧有一个纵贯的"U"型异常,在剖面中间有一个连续性较差的"U"型异常。左侧的"U"型异常由于远离矿区核心,根据总结的成因类型和地质勘探事实(1000测点500m以浅无金刚石矿),本研究认为其为断裂破碎带的可能性较大,故选取其"U"型异常转折端,解译为一整个深大断裂(图17)。

在剖面1800测点至深部500m左右有金刚石矿体的出现,此处远离主岩管,所以浅部的金刚石矿应为火山颈相,是由相转变金伯利岩管分支侵入导致。这也说明此处连续性较差的"U"型异常应为深大断裂,但是其深部受到的岩管影响较小,故将其解译为一整个断裂,浅部的"U"型异常解译为受金伯利岩岩管影响区(图17)。

3.3 三维地质建模

在完成基本的地球物理资料解译以后,笔者对 4个剖面中所含的二维地质信息有了一定的了解。 后续工作需要将4个剖面联系起来,开展如下 工作:

第一步:根据以上解译结果,笔者将4个剖面中

涉及的最明显的地球物理特征提取出来,并揭示其 所蕴含的地质意义;第二步:通过解析第一步提取出 的地球物理特征的地质意义,根据地球物理勘探标 准与成因类型,对提取出来的地球物理特征进行进 一步的细分;第三步:将细分后的地球物理特征再次 提取,并对提取后的地球物理特征进行地质上的解 释(表2)。提取的地球物理特征以及其可能指示意 义,均是基于对成因类型与地球物理勘探标准的 认识。

另外在构建主岩管时,还应参照浅部的岩管截 面形态。由于受 NNE 向导矿构造与 NW 向容矿构 造的控制,浅部岩管截面常为一个不规则的椭球, 长轴为 NW 方向,由此推测深部的岩管影响范围截 面也呈现一个长轴在 NW 方向的椭圆。对于4个 剖面中解译出的断裂,集中在岩管周围的深大断裂 明显呈 NNE 向分布,可分为两组断裂:一组基本上 与金刚石已知矿体的展布完全重合;一组离岩管稍 远(图 20)。

将 C1 剖面提取的"U"型异常区,以及 C2、C3、 C4 剖面提取的浅部靠近矿体的"U"型异常区、"V" 型异常区,合并为金伯利岩管影响区(含金伯利岩管 的破碎带)。主要的金伯利岩管赋存在这个区域内, 且该区域呈现上大下小的特征,上部大的区域为火 山颈相岩管影响范围,下部小的区域为根部相主岩 管影响范围(图 19)。

浅部基于实际地质资料(地质图、剖面、中段剖 面图、钻孔等)连续插值建立的岩管模型、矿体模型, 与结合大数据文本分析结果提取的金伯利岩管影响

Table 2 Geophysical feature extraction based on big data visualisation and analysis results					
地球物理特征粗分	地质意义	地球物理特征细分	地质意义		
C1剖面电阻U、V型异常	主岩管	电阻率梯度快速变化区域	主岩管外围区域		
		低阻异常区	主岩管核心区域		
C2、C3剖面中段低阻异常	岩墙	-	-		
C3剖面中的U、V型异常	断裂破碎带	浅部靠近矿体的U、V型低阻异常	含金伯利岩管的破碎带		
		深部的U、V型低阻异常	深部断裂破碎带		
	断裂破碎带	远离岩管的U型异常	断裂破碎带		
C4剖面中的U型异常		靠近矿体的浅部U型异常	含金伯利岩管的破碎带		
		连续性差的深部U型异常	深部断裂破碎带		
4个剖面中的电阻率等值线转折端与电阻梯度快 速变化区域	主干断裂	靠近岩管的主干断裂	主要的导矿断裂		
		远离岩管的主干断裂	区域性深大断裂		

表2 基于大数据可视化分析结果的地球物理特征提取

注:"-"表示无数据。





范围叠合的较好(图19、图20)。此外连续插值区的 矿体三维模型与深部的主岩管模型也具有较好的叠 合度(图18)。

4 含矿性分析

蒙阴西峪金刚石矿目前仅残留火山颈相与火山 通道相,实际的地质调查与勘探结果显示,越往深部 岩管逐渐汇聚为一,金伯利岩从火山颈相过渡到火 山通道相。因此,在深部找矿首要目标就是深部的



图 19 破碎带与金伯利岩影响区、金刚石矿体叠合图 1-连续插值区矿体模型;2-金伯利岩管影响区;3-C3 剖面提取的 破碎带;4-矿区外围破碎带

Fig. 19 Diagram of fracture zone overlaid with kimberlite-influenced zones and diamond ore bodies

1—Continuous interpolation area ore body model; 2—Kimberlite pipe Cinfluence area; 3—Fracture zone extracted from C3 section; 4—Peripheral fracture zone of the mining area

主岩管。深部主岩管由于获取向的勘探资料较少, 并不能精准定位,只能大体圈定其影响的范围。由 于蒙阴金刚石在浅部存在着岩管由中央向外围成矿 性递减的特点,所以最终选定由三维地质特征建模 所得到的深部主岩管核心区应为最佳的成矿远景区

C3 剖面浅部的破碎带与已知的金刚石矿体较近,而且与矿区 NNE 向导矿的主干断裂叠合较好。 金伯利岩在上涌过程中很可能会沿着构造裂隙赋 存其中,而且该破碎带处于浅部,是金伯利岩管逐

(图21)。

矿



图 20 岩墙、断裂、岩管影响区与浅部岩管叠合图 1一稍远离矿区核心的主干断裂;2一金伯利岩管影响区;3-C2、C3 剖面中提取的岩墙;4-穿过矿区核心的主干断裂; 5-连续插值区岩管

Fig. 20 Diagram of rock wall, faults, and rock pipes impact zones overlaid with shallow rock pipes

1—Main fault slightly away from the core of the mining area; 2—Kimberlite pipe influence area; 3—Rock walls extracted from C2 and C3 sections; 4—Main fault passing through the core of the mining area;
 5—Continuous interpolation area rock pipe

渐从根部相过渡为火山颈相的部位,是金伯利岩浆 影响范围开始变大的深度,且其与提取的三维地质 特征——岩管影响区有着较好的叠合性。本研究 认为C3剖面浅部的破碎带赋矿可能性大。金伯利 岩管深部的外围区域与核心区域紧密相连,通常岩 管的外围区域受围岩影响,角砾岩增多,相对于岩 管核心区域会较贫矿,但仍可能产出工业级金刚石 与少量宝石级金刚石。岩管外围区域仍是不可忽 视的成矿区域。笔者将C3剖面浅部破碎带与深部 岩管外围区域划分为二级成矿远景区(图22)。其 他断裂破碎带由于远离主岩管,其含金伯利岩的可 能性较小。





5 结 论

文章运用发现技术与大数据挖掘技术,构建了 研究区相关文本大数据库,并得到了对蒙阴西峪金 刚石矿成因类型与地球物理勘探标准的深入认识。 根据地球物理勘探标准与矿区成因类型文章对地球 物理电阻测深剖面进行了解译工作,并在三维空间 中整合了地球物理资料,完成了三维地质-地球物理 建模工作。结合三维地质-地球物理模型与大数据





Fig. 22 Tier 2 Mineralization target and shallow ore bodies
1—Continuous interpolation area ore body model; 2—Peripheral area
of the deep main rock pipe (second-level mineralization prospect area);
3—Shallow fracture zone extracted from C3 section

挖掘得到的地质认识,文章完成了对三维建模结果 的含矿性分析,最终圈定了2个找矿远景区。其中 深部金刚石岩管核心区域是深部找矿希望最大的区 域,后续工作应重点关注。

References

Wagner S. 2016. Big data analytics for earth sciences: The Earthserver approach[J]. International Journal of Digital Earth, 9(1): 3-29.

- Chen J P, Lü P, Wu W, Zhao J and Hu Q. 2007. A 3-D prediction method for blind orebody based on 3-D visualization model and its application[J]. Earth Science Frontiers, 14(5): 54-61(in Chinese with English abstract)
- Chen J P, Xiang J, Hu Q, Yang W, Lai Z L, Hu B and Wei W. 2016. Quantitative geoscience and geological big data development: A review[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 90(4): 1490-1515.
- Chen J P, Yu P P, Shi R, Yu M and Zhang S C. 2014. Research on threedimensional quantitative prediction and evaluation methods of regional concealed ore bodies[J]. Earth Science Frontiers, 21(5): 211-220(in Chinese with English abstract).
- Cheng G S, Liu W D, Chu Z Y, Zhou J, Zhao D Q, Hu G and Liang T T. 2020. Deep comprehensive geophysical characteristics and significance of the Xiyu kimberlites in the Mengyin County, Shandong Province[J]. Acta Geologica Simica, 94(9): 2772-2782(in Chinese with English abstract).
- Houlding B S and Renholme S. 1998. The use of solid modeling in the underground mine design[J]. Computer Application in the Mineral Industry, 12: 67-89.
- Li S, Chen J P and Xiang J. 2018. Prospecting information extraction by text mining based on convolutional neural networks—A case study of the lala copper deposit, China[J]. IEEE ACCESS, 6: 52286-52297.
- Li, S, Chen J P, Liu C and Wang Y. 2021. Mineral prospectivity prediction via convolutional neural networks based on geological big data[J]. Journal of Earth Science, 32(2): 327-347.
- Li W, Chen J P, Wang H F, Chu Z Y and Zhao H J. 2020. A new method of 3D structural model for prospecting kimberlite pipe[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 47(1): 102-114(in Chinese with English abstract).
- Liu C, Chen J P, Li S and Qin T. 2022. Construction of conceptual prospecting model based on geological big data: A case study in Songtao-Huayuan area, Hunan Province[J]. Minerals, 12(6): 669.
- Mao X C, Zhang B, Deng H, Zou Y H and Chen J. 2016. Three-dimensional morphological analysis method for geologic bodies and its parallel implementation[J]. Computers & Geosciences, 96: 11-22.
- Martínez-Álvarez F and Morales E A. 2019. Big data and natural disasters: New approaches for spatial and temporal massive data analysis[J]. Computers & Geosciences, 129: 38-39.
- Mitchell R H. 1986. Kimberlites: Mineralogy, geochemistry, and petrology[M]. New York: Plenum Press.
- Porwal A and Carranza E J M. 2015. Introduction to the special issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration[J]. Ore Geology Reviews, 71: 477-483.
- Piantadosi and Steven T. 2014. Zipf's word frequency law in natural language: A critical review and future directions[J]. Psychonomic Bulletin & Review, 21(5): 1112-1130.

Simon W H. 3D geoscience modeling: Computer techniques for geo-

logical characterization[M]. Berlin: Springer Science & Business Media. 85-90.

- Wang C B, Ma X Q, Chen J G and Chen J W. 2018. Information extraction and knowledge graph construction from geoscience literature[J]. Computers & Geosciences, 112: 112-120.
- Xiang L and Zheng J P. 2020. Formation conditions of primary diamond and thoughts on their prospecting in China[J]. Acta Geologica Sinica, 94(9): 2574-2587(in Chinese with English abstract).
- Yu Y, Zou C, Dong D, Wang S, Li J, Yang H and Huang J. 2014. Geological conditions and prospect forecast of shale gas formation in Qiangtang Basin, Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 88(2): 598-619.
- Zang S and Ye M. 2015. Human resource management in the era of big data[J]. Journal of Human Resource and Sustainability Studies, 3 (1): 41.
- Zhang C J, Tian X J, Chen W T, Zhang Z Q and Du S X. 2020. The magmatic intrusive sequence and the metallogenic model of diamondiferous kimberlite in the Mengyin area, western Shandong[J]. Acta Geologica Simica, 94(9): 2666-2675(in Chinese with English abstract).
- Zhang J T, Yu L and Liu C P. 2020. Characteristics of regional gravity, magnetic anomalies and deep structural geological background of primary diamond deposits in the western Shandong Province[J]. Acta Geologica Simica, 94(9): 2783-2795(in Chinese with English abstract)
- Zhang P Q. 2006. Origin of kimberlitic pipes in Shandong Province[D]. Supervisor: Du Y S. Beijing: China University of Geosciences(in

Chinese with English abstract).

Zhang Z J, Chen G X, Kusky T, Yang J and Cheng Q M. 2023. Lithospheric thickness records tectonic evolution by controlling metamorphic conditions[J]. Science Advances, 9(50): eadi2134.

附中文参考文献

- 陈建平,吕鹏,吴文,赵洁,胡青.2007.基于三维可视化技术的隐伏 矿体预测[J].地学前缘,(5):54-62.
- 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.
- 程光锁,刘卫东,褚志远,周军,赵德庆.2020.山东蒙阴县西峪金伯 利岩带深部综合地球物理特征及其意义[J]. 地质学报,94(9): 2772-2782.
- 李伟,陈建平,王焕富,褚志远,赵红娟.2020.金伯利岩管三维构造 模型找矿新方法[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 47(1): 102-114.
- 向璐,郑建平.2020.中国原生金刚石形成条件及找矿思考[J].地质学 报,94(9):2574-2587.
- 张成基,田京祥,陈文韬,张增奇,杜圣贤.2020.鲁西蒙阴地区含金刚 石金伯利岩的岩浆侵入序列及成矿模式[J].地质学报,94(9): 2666-2675.
- 张建太,于磊,刘传朋,李兆营,王伟德.2020.鲁西金刚石原生矿床区域 重磁异常特征及深部地质构造背景[J]. 地质学报,94(9):2783-2795.
- 张培强.2006.山东金伯利岩管成因[D].导师:杜杨松.北京:中国地

地质 .).导师:A CA 和COLAO ACO ACO