

鲁西金刚石原生矿近十年深部成矿预测

冯爱平, 刘传朋*, 褚志远, 夏立献, 肖丙建, 李新凤, 徐磊磊, 赵秀芳

山东省第七地质矿产勘查院, 山东临沂 276006;

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, 山东临沂 276006;

山东省金刚石成矿机理与探测院士工作站, 山东临沂 276006

摘要: 山东近十年为实现实现金刚石找矿新突破, 针对鲁西金刚石原生矿“攻深扫盲”, 开展了基于不同技术方法的深部成矿预测, 主要包括: 金刚石资源量定量预测(1600 m 以浅), 可控源大地电磁测深法(CSAMT)反演预测(1000 m 以浅), 基于重力、大地电磁测深、反射地震综合物理方法反演预测(4 km 以浅), 基于断裂构造特征分析对已知矿体深边部三维定位定量预测。本文系统阐述各深部预测的技术方法、参数选择、技术路线等, 评价各预测方法的实际效果, 提出将地球物理、地质钻孔、地质剖面等多元地质信息有效融合进行三维综合信息成矿预测的思路, 以进一步提高深部成矿预测的有效性和可靠性, 总结了鲁西金刚石矿田由浅至深关于岩性、金刚石粒度及规模形态的变化规律, 为今后金刚石找矿及预测工作中有效判别金伯利岩筒的“相带”部位、规模形态及含矿性提供经验积累, 助力金刚石找矿及预测实现新突破。

关键词: 金刚石原生矿; 深部成矿; 地球物理探测; 三维定量预测; 鲁西

中图分类号: P631 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.100901

Deep Metallogenic Prediction of a Primary Diamond Deposit in Recent Ten Years in Western Shandong Province

FENG Ai-ping, LIU Chuan-peng*, CHU Zhi-yuan, XIA Li-xian,
XIAO Bing-jian, LI Xin-feng, XU Lei-lei, ZHAO Xiu-fang

The 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province, Linyi, Shandong 276006;

Key Laboratory of Diamond Mineralization Mechanism and Exploration, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources,
Linyi, Shandong 276006;

Academician Workstation of Diamond Mineralization Mechanism and Exploration in Shandong Province, Linyi, Shandong 276006

Abstract: In recent ten years, in order to achieve a new breakthrough in diamond prospecting, Shandong Province has conducted deep metallogenic prediction based on different technical methods, aiming at the “Fight against illiteracy in depth” of primary diamond deposits in western Shandong Province. It mainly includes, the quantitative prediction of diamond resources in the depth of shallower than 1600 m, the inversion prediction of CSAMT(at depths shallower than 1000 m), the inversion prediction based on comprehensive physical methods of gravity, MT and reflection seismic (at depths shallower than 4 km), and 3D positioning and quantitative prediction of depth and extent of known orebodies based on the analysis of fault structure characteristics. This paper systematically describes the technical methods, parameter selection, and technical route of each deep prediction, and evaluates the actual effect of each prediction method. In order to further improve the effectiveness and reliability of deep metallogenic prediction, the idea of three-dimensional comprehensive information metallogenic prediction based on the effective fusion of geophysical, geological drilling, geological section and other geological information is proposed. In addition, the change law of lithology, diamond grain size, and scale

本文由山东省地质调查院矿产资源潜力评价专项(编号: 1212010813014)、山东省地质矿产勘查开发局地质科技攻关项目(编号: KY201602)、山东省科学技术厅重大科技创新工程(编号: 2017CXGC1607)、山东省地质矿产勘查开发局 2020 年度局控地质勘查与科技创新项目(编号: 202011; 202012)联合资助。

收稿日期: 2021-06-07; 改回日期: 2021-10-08; 网络首发日期: 2021-10-11。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 冯爱平, 女, 1983 年生。高级工程师。主要从事地质调查与矿产勘查工作。E-mail: 13668697257@139.com。

*通讯作者: 刘传朋, 男, 1981 年生。高级工程师。主要从事区域地质调查与矿产勘查。E-mail: liuchuanpeng666@163.com。

form from shallow to deep is summarized for the diamond field in western Shandong Province. These results provide a basis for the effective discrimination of “facies zone” position, scale, shape, and ore bearing property of kimberlite tubes in diamond prospecting and prediction in the future, and help realize a new breakthrough in diamond deep prospecting and prediction.

Key words: primary diamond deposit; deep metallogenesis; physical probes; 3D quantitative prediction; western Shandong Province

金刚石由于其优异的物理性能及稳定的化学性质被广泛应用于工业、军事和空间技术等方面。

中国的金刚石资源比较稀缺,迄今虽在16个省(区)有发现金刚石的报道,但仅在山东蒙阴和辽宁瓦房店地区探明具工业价值的金刚石原生矿,且富矿的辽宁50号金刚石矿和山东红旗1号金刚石矿均已闭坑停采,急需寻找新的金刚石资源,缓解国内供需压力。金刚石具有严苛的成矿地质条件,加之经过近几十年的金刚石找矿勘探工作的大规模开展,新发现地(浅)表金刚石矿的形势愈加不容乐观,而我国大多数矿山深部仍有巨大的找矿潜力(赵鹏大等,2004;翟裕生等,2004;薛迎喜等,2018),因此深部找矿成为当前工作重点。

成矿预测是实现科学找矿勘探的重要途径和方法(赵鹏大,2007)。近十余年来,山东针对金刚石找矿进行“攻深扫盲”开展了一系列的成矿预测工作,在鲁西常马和西峪矿带开展深部资源量定量预测、探索综合地球物理方法在深部找矿探测的应用、基于3D定位定量预测隐伏矿体等,取得了一定的成果。本文系统阐述各深部预测方法过程、技术路线及现实效果,以期为金刚石深部探测工作提供一定借鉴和启发,助力实现金刚石找矿新突破。

1 地质概况

1.1 区域地质背景

鲁西金刚石原生矿位于郯庐断裂带(山东段称“沂沭断裂带”)西侧、鲁西地块中核部,根据大地构造单元划分属于华北板块鲁西隆起区之鲁中隆起(图1)。华北板块是中国最大最古老的克拉通陆块,在本区主要由前寒武纪结晶基底,新元古代—古生代海相沉积盖层,中新生代陆相盆地沉积组成(宋明春等,2020)。其中,前寒武纪结晶基底主要由一套TTG(奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩)岩系组成,零星分布新太古代沂水岩群和泰山岩群麻粒岩相、角闪岩相深变质岩。区内岩浆岩主要发育中生代侵入岩,它是晚中生代以来“克拉通活化”作用(朱日祥等,2011;郑建平和周新华,2013;郑永飞等,2018;曾普胜等,2021)的结果,规模一般不大,多为浅成中基性岩体,少量花岗岩(宋明春等,2009)。区内脆性断裂、基底韧性剪切带、褶皱等大型构造线呈NW向,控制着鲁西一系列凹陷、凸起呈NW向条带状展布。金刚石原生矿则多赋存在NE、NNE向次级断裂中。

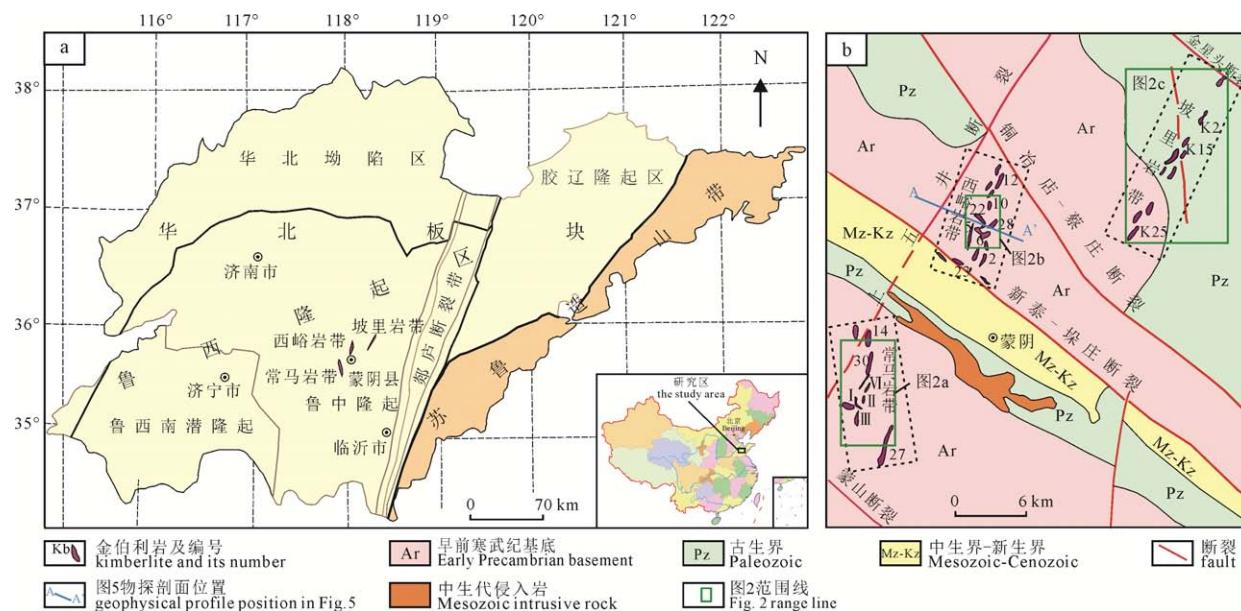


图1 鲁西蒙阴金刚石矿田区域地质背景(a)及金伯利岩带分布简图(b)

(据山东省国土资源厅,2014; 张培强,2006)

Fig. 1 Regional geological background of diamond ore field and kimberlite belt distribution in western Shandong Province (after Department of Land and Resources of Shandong Province, 2014; ZHANG, 2006)

1.2 矿床地质特征

鲁西金刚石原生矿位于郯庐断裂带以西45~60 km, 总体走向55°, 矿带全长约60 km。赋矿岩体(金伯利岩)主要产于新太古代TTG片麻岩中, 少数产于灰岩中, 最高侵位层位为中奥陶世马家沟群五阳山组。矿床受断裂控制作用明显, NW向的蒙山断裂、新泰—垛庄断裂、铜冶店—蔡庄断裂、金星头断裂, 控制着矿带的展布(贺灌之, 1980; 赵鹏大等, 1983; 万方来等, 2019), 使之自南而北常马、西峪、坡里三个岩带呈“雁列式”展布(图1b)。岩带中NNE向张性或张扭性断裂为主要容矿赋矿构造(庄德厚, 1984; 王照波等, 2013; 王照波和王庆军, 2014; 李伟等, 2020a), 岩脉沿NNE向断裂贯穿并赋存于破碎带及密集节理带中, 脉体形态、大小、产状等严格受其控制(图2)。而NNE向断裂和NW向断裂交接复合部位往往产生金伯利岩管或金伯利岩脉的膨大部位。全区矿床共由47条岩脉、10个岩管和1个岩床组成(孔庆友等, 2006)。其中:

常马岩带(图2a): 总体走向354°, 长约14 km, 宽约2 km, 由8条岩脉和胜利I号大小岩管组成。岩脉走向20°~35°, 南段南倾, 北段北倾, 倾角75°以上, 脉长几十米至1000余米, 脉宽一般20~30 cm。胜利I号岩管位于岩带的中南部, 大管地表呈椭圆形, 长轴长约100 m, 短轴长50 m, 总体倾向SW, 倾角约85°。小管地表呈轭形, 长65 m,

宽10~20 m, 倾向北西, 倾角86°~90°(山东省地质局第七地质队, 1979, 1983)。在垂深250 m以下两管合为一体, 且规模变小, 延深超1 km。该岩带单矿体金刚石平均品位3~963.34 mg/m³, 矿体块段最高品位在岩脉和岩管中分别达2142.62 mg/m³、3155.00 mg/m³(孔庆友等, 2006)。该岩带金刚石以淡黄色为主, 其次为无色和浅黄棕色, 粒径以0.5~3.0 mm为主, 大于2.0 mm者占3.82%, 且粒径差异较大, 最大者粒径超8 mm, 重量达119.01 ct(山东省第七地质矿产勘查院, 2017a, b)。岩性以斑状金伯利岩为主, 以富含镁铝榴石为特征。细粒金伯利岩一般构成岩脉的边部, 在岩管或岩脉膨大部位发育金伯利角砾岩。围岩为新太古代泰山序列英云闪长质-石英闪长质(TTG)片麻岩。

西峪岩带(图2b): 呈北东10°~15°方向延伸, 岩带长12 km, 宽0.5~1 km, 由14组岩脉、8个岩管和1个岩床组成。岩脉断续分布在相距500~800 m的两条北北东向的破碎带或节理密集带内, 走向与岩带一致, 倾角大于70°, 脉长一般400~1000 m, 最长2050 m, 宽一般20~60 cm。岩管集中分布在岩带中部近1.5 km²的范围内, 称为“西峪岩管群”, 单管面积(50~260)m×(30~60)m, 在垂深330 m各岩管基本合为一体, 规模明显减小, 延深超1 km。该岩带单矿体金刚石平均品位3.82~224.33 mg/m³, 一般几至数十mg/m³。该岩带金刚石

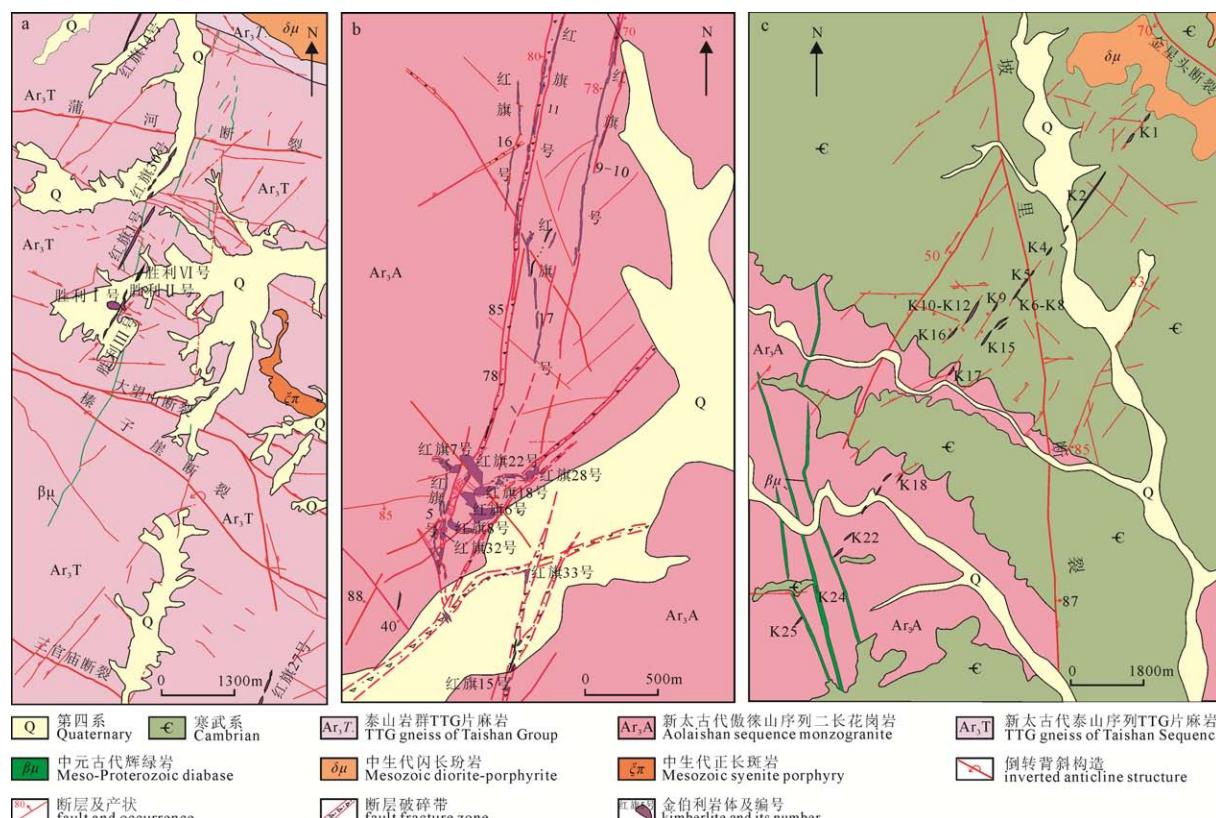


图2 常马(a)、西峪(b)、坡里(c)岩带地质构造简图(据山东省地质局第七地质队, 1979, 1983)

Fig. 2 Geological structure of Changma (a), Xiyu (b) and Poli (c) rock belts
(after The 7th Geological Team of Shandong Geology Bureau, 1979, 1983)

以无色为主,粒径差异较小,以0.5~1.0 mm占比最高,大于2.0 mm者占比2.10%(山东省第七地质矿产勘查院,2017a),最大粒径超4 mm,重量18.55 ct(山东省第七地质矿产勘查院,2017b)。该岩带岩性以金云母斑状金伯利岩为主,其次为细粒金伯利岩、镁铝榴石斑状金伯利岩和金伯利角砾岩。北北东向岩体围岩为新太古代傲徕山序列二长花岗岩,南端北西向岩体围岩为早古生代寒武—奥陶纪沉积盖层。

坡里岩带(图2c):由25组岩脉组成,沿北东40°方向的长约18 km,宽约0.6 km的狭长地带断续分布。岩脉呈近平行的侧列式展布,走向与岩带一致,多倾向NW,倾角大于80°。脉长数百米至1000多 m不等,宽1~2 m。该岩带金伯利岩为富金云母型,不含金刚石或品位极贫,均不构成矿体。该岩带无色金刚石比例达70%以上,粒径均小于1.0 mm(山东省第七地质矿产勘查院,2017a)。该岩带中北部岩体围岩为寒武纪沉积盖层,南部岩体围岩为新太古代傲徕山序列二长花岗岩。

2 深部资源量定量预测

2007—2012年,在“全国矿产资源潜力评价”大背景下,采用矿床模型综合地质信息预测技术进行定性预测的同时,在鲁西常马和西峪岩带首次运用GIS技术及数学方法在充分研究矿体成矿机制、深部形态、规模及品位变化趋势等基础上进行原生矿深部资源量定量预测(山东省第七地质矿产勘查院,2012)。这是省内唯一一次深部资源量定量预测,是一次理论驱动与数据驱动的融合。

2.1 “理论驱动”及预测深度确定

预测深度是深部资源量定量预测的重要关键参数。“深部”是一个相对概念(翟裕生等,2004),预测深度也并不是越大越好。在成矿模式、成矿机制等理论指导下,查明成矿地质体侵位深度及剥蚀程度,才能做出合理和符合地质实际的成矿深度估算(张德会等,2011)。

金刚石的地幔捕捞晶成因(Haggerty, 1986)普遍被地学界接受。金刚石在距地表150~250 km,温度900~1400°C,压力4.5~6.0 Gpa的高温、超高压、中等氧逸度条件下的岩石圈地幔环境(吕青等,2021)形成后,幔源的金伯利岩或钾镁煌斑岩岩浆作为载体经过“金刚石稳定区”捕获并携带金刚石快速侵位,在地表或近地表以火山爆发或潜火山隐爆形式形成含金刚石的金伯利岩或钾镁煌斑岩(郑建平等,1989; Wilson and Hedad, 2007; Russell et al., 2019; Smit and Shirey, 2019)。Mitchell(1986)建立了金伯利岩浆理想的侵位成矿模式(图3a),它是一个完整的

金伯利岩筒,自上而下由火山口、火山道及根部带三个部分组成。其中,火山道相是岩筒的主要部分,占整个岩筒的2/3以上,长度可超2 km。值得注意的是,根部带形态复杂,可急剧或逐渐膨胀或收缩,常有盲端延伸,受围岩中节理和断裂强烈影响伴生岩墙和岩脉。根部带长度可达1 km(Field et al., 2008)。

众多研究证明,鲁西金伯利岩浆侵位符合Mitchell模式,且侵位后遭受了严重的剥蚀,只保留了根部带(罗声宣等,1999;孔庆友等,2006;张培强,2006;武雨飞,2014;于学峰等,2015)。时值鲁西地区金伯利岩管最大勘探深度600 m。根据理论研究(Mitchell, 1986; Field et al., 2008)结合勘探实际,确定最大预测深度为1600 m。其中将最大勘探深度600 m下延1倍,即600~1200 m作为可靠的334-1类别远景资源量预测深度范围,1200~1600 m为334-2类别远景资源量预测深度范围。

2.2 岩管三维地质特征及品位变化

在一定的成矿机制约束下,查明浅部成矿地质体形态、产状、分布范围、规模及变化趋势等(三维),可推测深部矿体延展变化情况(薛建玲等,2020)。利用GIS(Mapgis6.7)的空间分析技术中的“多层立体叠置”功能模块对不同垂深的岩管自动进行叠加分析,直观显示金伯利岩管三维地质特征,包括岩管形态、分布、规模、产状及各要素随垂深变化情况等(图3b, c)。由图可知,金伯利岩管形态随深度变化复杂,同时表现出以下规律:一是向中间聚拢性和深部连通性,胜利1号大小岩管在垂深300 m合为一体,西峪岩管群由地表的八个岩管向下逐渐合并收拢,除红旗28号、30号岩管深部逐渐过渡为脉体形态外,其余6个岩管在垂深约330 m合为一体;二是岩管水平断面面积总体随深度增加而减小。因此,无论是胜利1号大小岩管还是西峪岩管群都视作一个岩管进行预测,预测范围内岩管水平断面面积根据浅部岩管的平均面积缩减率求得。

深部预测矿体的品位多是根据浅部已控制成矿地质体的品位变化特征来确定(赵建军等,2011)。根据勘探资料成果,胜利I号大小岩管在合并前,小管金刚石品位呈急剧下降趋势,由1053.562 mg/m³降至347.133 mg/m³,降幅高达67.05%,而大岩管则呈波动式渐降趋势,待大小岩管合并后金刚石品位变化幅度不大。西峪岩管群自地表至250 m垂深金刚石品位较稳定,自250 m垂深以下品位持续增高,至600 m垂深达到最高值110.03 mg/m³,之后急剧下降,至900 m垂深降为23.82 mg/m³(图4)。由此可见,不同岩管的含矿性随深度变化不同,同一岩管的含矿性在不同垂深的变

化亦不相同。金伯利岩管根部带的复杂性毋庸置疑, 因此深部预测用勘探深度范围内矿体的平均品位表示, 其可靠性用体积含矿率修正系数进行制约。

2.3 公式选择及预测结果

鲁西金伯利岩管为倾角陡直的形态不规则的管状体, 虽延深上偶有“盲端”产出, 但水平断面面积总体随深度增加而减小, 因此用地质体积法进行定量估算。公式如下:

$$Q = \frac{S_1 + S_2}{2} \cdot h \cdot \gamma_v \cdot K$$

式中: Q —深部预测资源量; S_1 、 S_2 —预测部分岩管的上下底面积, 其中 S_1 即最大勘查深度处矿体水平断面面积, 为已知量, S_2 根据岩管水平断面面积的缩减率求得; h —预测部分延深; γ_v —体积含矿率,

为查明资源总量与含矿地质体总体积的比值; K —体积含矿率修正系数, 334-1 类别预测资源量定为 0.6, 334-2 类别为 0.3。

根据以上预测技术方法, 最终在常马和西峪岩带深部预测金刚石量 875.5 万 ct。其中, 1200 m 以浅岩管深部预测金刚石量 557.6 万 ct。对比最新深部勘查成果, 胜利 I 号岩管和西峪岩管群在 1000 m、1050 m 以浅新增金刚石量 495.2 万 ct, 由此可见, 1200 m 以浅预测资源量可信度较高。

3 基于地球物理方法的深部探测

由于金伯利岩体独有的物性特征及成矿背景, 应用地球物理勘查方法寻找金伯利岩体由来已久, 20 世纪 60 年代末即用物探方法找到了胜利 I 号

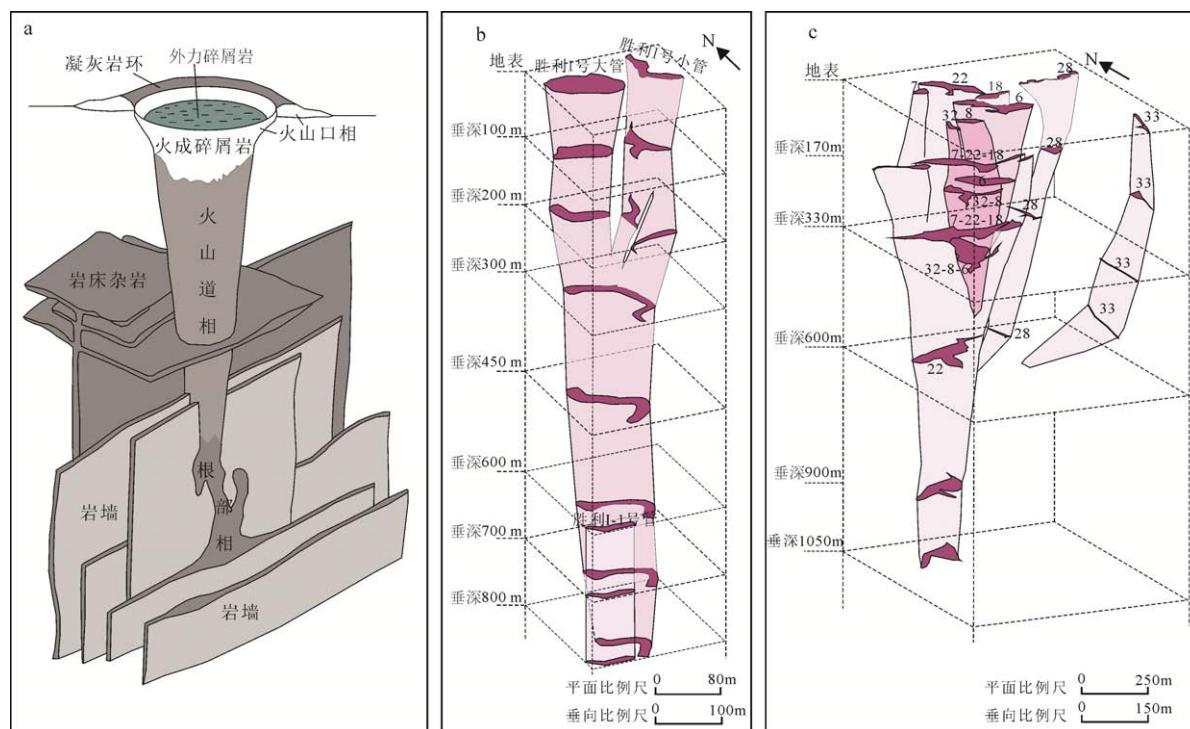


图 3 金伯利岩浆侵位模式(a)及鲁西常马胜利 1 号岩管(b)、西峪岩管群(c)三维地质形态图

(据 Mitchell, 1986; 据山东省第七地质矿产勘查院, 2015, 2017 勘探数据绘制)

Fig. 3 Emplacement pattern of kimberlitic magma(a)and 3D geological morphology map of Changma Shengli No.1 rock pipe (b), Xiyu rock pipe group (c) in western Shandong (after Mitchell, 1986; drawn based on exploration data of the 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province, 2015, 2017)

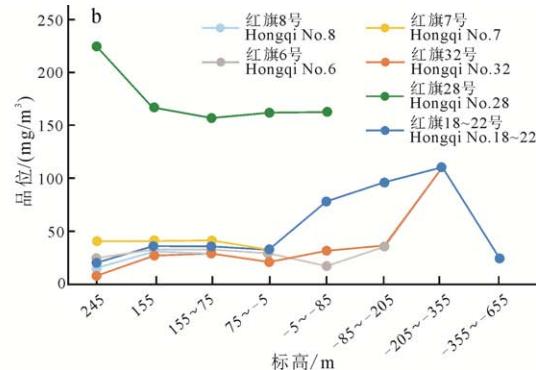
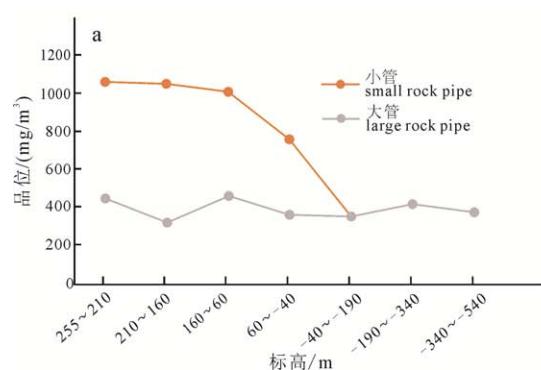


图 4 胜利 1 号岩管(a)、西峪岩管群(b)品位随深度变化曲线图

Fig. 4 Grade variation curve with depth of Shengli No. 1 (a) and Xiyu rock pipe group (b)

岩管, 胜利 2、3 号岩脉等(山东省地质局第七地质队, 1979, 1983), 多以电、磁法为主(孙培基, 1993)。近年来, 针对探测隐伏矿床, 地球物理方法在加大探测深度和提高分辨率方面不断进步完善, 成为获得研究区深边部地质结构信息的有效方法(吕庆田等, 2004, 2005, 2007; 严加永等, 2008a, b; 刘彦等, 2012; 薛建玲等, 2020)。如: 大地电磁法(MT)、音频大地电磁法(AMT)及可控源音频大地电磁法(CSAMT)等电法勘探技术不但探测深度大, 兼具测深和剖面测量性能, 而且在垂向和横向的分辨率都较高, 对探寻深部隐伏矿及深部地质结构具有良好效果(刘天佑, 2007; 吴俊华等, 2010); 地震方法通过宽屏地震层析成像、远震地震层析成像、反射地震等技术可以获得深部地质体深度、空间形态及构造展布等信息, 也被广泛应用于探寻深部隐伏矿体(吕庆田等, 2005; Jiang et al., 2013; 袁峰等, 2014)。

3.1 单一地球物理方法深部找矿探测

在鲁西常马和西峪岩带, 采用 CSAMT 对浅部金伯利岩体进行追踪、勘查, 指导深部找矿。可控源音频大地电磁测深剖面布设在常马胜利 I 号岩管南侧及西峪岩管群附近, 探测深度 1 km, 仪器选用加拿大凤凰公司生产的 V8 多功能电法工作站, 线距 80~100 m, 点距 20 m(褚志远等, 2018)。因断裂带中金伯利岩体相对于二长花岗岩等围岩呈低阻反映, 因此根据剖面上的低阻分布区进行找矿预测, 推测岩管深部延深情况。应用该技术方法成功指导钻探工程揭露到深部金伯利岩, 应用效果良好。

3.2 综合地球物理方法深部探测评价

随着综合地球物理勘查技术在断裂展布、深部岩浆岩体探测方面的广泛应用(吴俊华等, 2010; 邱君等, 2019; 徐志敏等, 2019), 在鲁西地区探索重力、电法、反射地震综合勘探技术进行深部金伯利岩体探测与预测评价。在西峪岩管群附近, 布设长度 10 km 的重力、反射地震和大地电磁测深联合剖面, 分析 4 km 以浅的金伯利岩体、构造空间分布及两者之间关系, 指导深部资源预测评价。其中, 大地电磁测深剖面点距 200 m, 采用凤凰公司的 V8 电法工作站观测频率 $10^{-4} \sim 10^3$ Hz 的近似平面波的天然电磁场, 布极方式采用十字型、L 型或 T 型, 工作数据采集时间为 2 个小时, 采集的有效频率范围 320~0.1 Hz, 资料处理及解译采用加拿大凤凰公司开发的 SSMT2000 软件和意大利 GEOSYSTEM 公司开发的 WINGLINK 软件, 资料处理反演深度为 4000 m。重力测量采用加拿大先得力公司生产的 CG-5 型相对重力仪, 正常重力值公式采用 1979 年国际大地测量和地球物理联合会(IUGG)推荐的

1980 公式, 即 $\gamma_0 = 978\ 032.7 \times (1 + 0.005\ 302\ 4 \sin 2\Phi - 0.000\ 005\ 8 \sin 22\Phi)$ 。重力反演采用重磁数据软件 RGIS2016, 反演深度 2400 m, 重力定量计算所用密度参数如下: 二长花岗岩: 2.60×10^3 kg/m³; 金伯利岩体: 2.82×10^3 kg/m³; 第四系: 1.90×10^3 kg/m³。反射地震法勘探设备为 SN388 型数字地震仪及 Kz-28 型地面液压驱动可控震源车, 资料处理使用法国 CGG 公司的 Geovecteur Plus 交互地震数据处理系统在 SunBlade2000 工作站进行处理, 反演深度 3000 m, 需要提及的是, 测区内岩性主要为二长花岗岩和金伯利岩体没有完整的地层, 不易形成良好的地震波反射界面, 不会出现明显的标准层反射界面, 但侵入的金伯利岩体与周围的二长花岗岩仍存在一定的波阻抗差异, 可形成反射波能量稍强的反射界面, 据此来解译金伯利岩体分布。

根据综合解译成果(图 5)可知: ①三种物探方法均推断出两处断裂带, 虽不同物探方法反演推测出的主断裂的上视断点在地表的投影位置有所差别, 但所推测的断裂位置及倾向、倾角等特征基本吻合。②在断裂带内有地震反射异常波的出现, 结合浅部已有金伯利岩体和钻孔分布, 推测深部金伯利岩的存在。再结合金伯利岩的低电阻率特征在大地电磁测深剖面中的反映, 推断 3000 m 以浅断裂带内金伯利岩有发育空间(山东省第七地质矿产勘查院, 2020; 程光锁等, 2020)。笔者认为, 鲁西地区采用集重力、反射地震及大地电磁测深方法于一体的综合地球物理方法, 同时综合地质、钻探等约束信息对 4 km 以浅金伯利岩体、断裂构造进行反演解译, 三种方法起到了相互验证、相互补充的作用, 反演成果一致性良好。但“推测 3000 m 以浅断裂带内金伯利岩有发育空间”的结论与现阶段普遍认为的“金伯利岩筒根部带长度可达 1 km”差距较大, 或许只是断裂破碎带或其他低阻低密度地质体的反映, 需要钻探等有效手段进行进一步验证。

4 基于三维技术的深边部定位定量预测

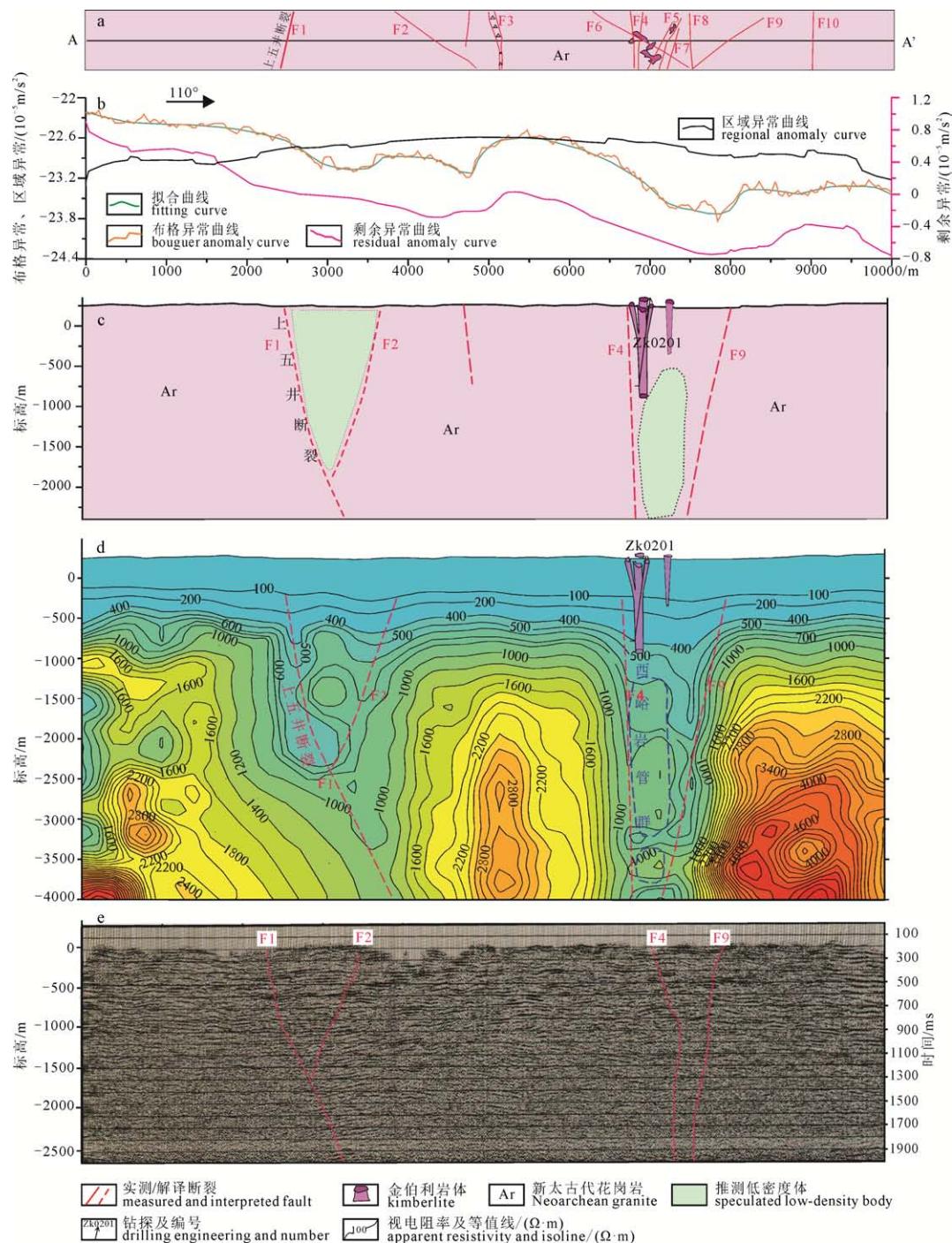
自 20 世纪 80 年代末引入 EarthVision 以来, 三维地质建模技术在国内迅速发展, 广泛应用于国内百余处典型矿区的三维建模与找矿预测实践(吴俊华等, 2010; 袁峰等, 2014; 陈建平等, 2014; 毛先成等, 2016), 以三维地质建模技术为核心的数据集成技术逐渐成为深部找矿预测的重要技术手段, 证据权方法、信息量方法、神经网络法等成为定位定量预测的普遍方法。在鲁西常马、西峪矿带, 借助三维建模技术, 以断裂构造特征分析为切入点, 基于证据权重法及信息量法对深边部隐伏矿体进行定量

化预测(山东省第七地质矿产勘查院, 2020; 李伟等, 2020b)。技术路线为: 三维实体建模—成矿预测有利信息筛选及找矿模型建立—三维异常重构—一定量化预测模型建立—靶区圈定。

4.1 三维实体建模及地质找矿模型建立

三维实体建模的数据源采用了平面地质数据、地质钻孔数据、剖面地质数据。其中, 平面地质数据包括地形地质图 2 张、中段地质平面图 7 张, 深

度范围自地表~450 m; 地质钻孔数据指钻孔柱状图 200 张, 包括钻孔测量数据、地质编录数据及化验数据等, 深度范围 39~1027 m; 剖面地质数据主要指勘探线剖面图(63 张), 深度范围 250~1050 m。针对以上数据进行规范化和统一化处理建立矢量数据库, 借助 Surpac 建模软件根据线框建模方法对边界线进行提取构建金伯利岩管和断裂构造三维实体模型。



a—平面地质简图; b—重力异常剖面图;

d—大地电磁测深视电阻率等值线断面和解译图; e—地震反射剖面成果解译图。

a—plane geological sketch; b—gravity anomaly profile; c—involution result map of gravity profile; d—section and interpretation of apparent resistivity isoline of magnetotelluric sounding; e—interpretation map of seismic reflection profile results.

图 5 重力、大地电磁测深、反射地震剖面综合解译成果图

Fig. 5 Comprehensive interpretation results of gravity, magnetotelluric sounding, and seismic reflection profiles

因①鲁西金刚石原生矿构造控矿作用明显;②金伯利岩体侵位对围岩无选择性(贺灌之, 1980; 董振信, 1991; 尹作为等, 2005);③围岩蚀变信息不强(张成基等, 2020)。因此, 从断裂构造入手, 包括构造含矿特征、导矿容矿特征、展布特征及构造带特征, 筛选出成矿预测有利信息, 建立地质找矿模型(表 1)。

4.2 三维异常空间重构

根据找矿模型, 对断裂进行相关的异常信息提取进行三维异常空间重构, 包括构造含矿性分析、构造等密度、构造频数、主干断裂、构造方位异常度、方位异常、构造交点数、断裂缓冲区等(表 1)。其中, 构造等密度反映单位块体内断裂构造的密集程度, 用单位块体网格内断裂构造总长度与块体网格边长的比值来表示。构造频数反映单位块体内构造发育的复杂程度, 用穿过块体网格的断裂总条数表示。用构造等密度与构造频数的比值, 表征主干构造。针对线性构造的方位特征, 通过构造异常方位来进行异常重构, 它代表单个块体网格内方位异常的构造总长度在该块体网格内所有线性构造中

表 1 地质找矿模型及三维异常空间重构
Table 1 Geological prospecting model and 3D anomaly space reconstruction

控矿要素	特征描述	变量类型	矿化异常三维空间重构
断裂构造	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	断裂交汇部位	断裂缓冲区	
	构造中心对称度	断裂交点数	

所占的比例。其计算方法是将区域内的所有线性构造展布方向($0 \sim 180^\circ$)按照一定的区间间隔进行分隔, 统计每个区间内其构造长度的和, 将各个区间的长度和按由大至小进行排序, 并依次累加, 当其累加值达到区域内所有线性构造长度的 60%时, 选择该区间作为异常区间, 最后统计各个块体网格的构造异常方位, 其值在 0 ~ 1 之间。

4.3 定量化预测模型建立

采用“立方体模型”预测法, 将研究区划分成若干个等大(基于分形理论确定最佳尺度为 10 m)的三维立方块, 每个立方块视作均质同性体, 根据建立的实体模型, 结合块体单元大小, 提取不同深度层次(深度分层尺度同块体单元边长)的断裂分布的数据文件, 将其导入到三维预测软件(3DMP)中, 据前述方法对立方块每个构造异常值进行计算, 用相关地质统计学方法与已知金刚石原生矿体进行空间叠加分析, 选定有利区间, 建立定量化预测模型(表 2)。

4.4 找矿靶区圈定

4.4.1 西峪矿集区找矿靶区圈定

西峪矿集区基于信息量法进行成矿靶区圈定。根据确定的定量化预测模型, 将其每个块体单元建立各个预测因子属性, 赋值 0 或 1 代表各块体是否包含该预测因子, 然后利用条件概率对各预测因子的找矿信息量进行计算, 公式为 $I_{A(B)} = \lg[P(A/B)/P(A)]$, 式中 $I_{A(B)}$ 为 A 标志有 B 矿的信息量, $P(A/B)$ = 包含 A 标志的矿体数/研究区总矿体数, $P(A)$ = 研究区 A 标志块体数/研究区总块体数。再计算各块体单元内的信息量总和, 最后将所有块体的信息量值进行分级统计(表 3), 并选择累积矿块比与累积块数比之比值稳定、块体空间分布与已知矿体叠合度高的信息量范围区间生成的有利块体区域进行靶区圈定。因此, 根据信息量大于 2.7 并结合信息量大于 2.1 和大于 2.4 的块体区域

表 2 西峪、常马矿集区区域定量化预测模型
Table 2 Regional quantitative prediction model of Xiyu and Changma ore concentration areas

控矿要素	异常空间重构信息	重构异常量化区间		备注
		西峪矿集区	常马矿集区	
构造条件	断裂构造	断裂构造	断裂构造	立方块边长 10 m
	等密度	(2.185 9 ~ 4.730 3)	(17.781 ~ 30.837)	
	频数	(2.659 9 ~ 4.540 5)	(5.410 ~ 9.472)	
	主干断裂	(0.483 5 ~ 1.418 4)	(1.316 ~ 3.103)	
	方位异常度	(0.020 0 ~ 0.190 0)	/	
	断裂缓冲区	断裂 40 m 缓冲区	/	
	断裂交点数	(0 ~ 1.514 2)	/	
	中心对称度	(0 ~ 0.119 9)	(0.699 ~ 0.973)	
异常方位		(0 ~ 0.009 7)		
		(0.126 2 ~ 0.203 8)	(0 ~ 0.063)	
		(0.310 6 ~ 0.514 5)	(0.189 ~ 0.692)	

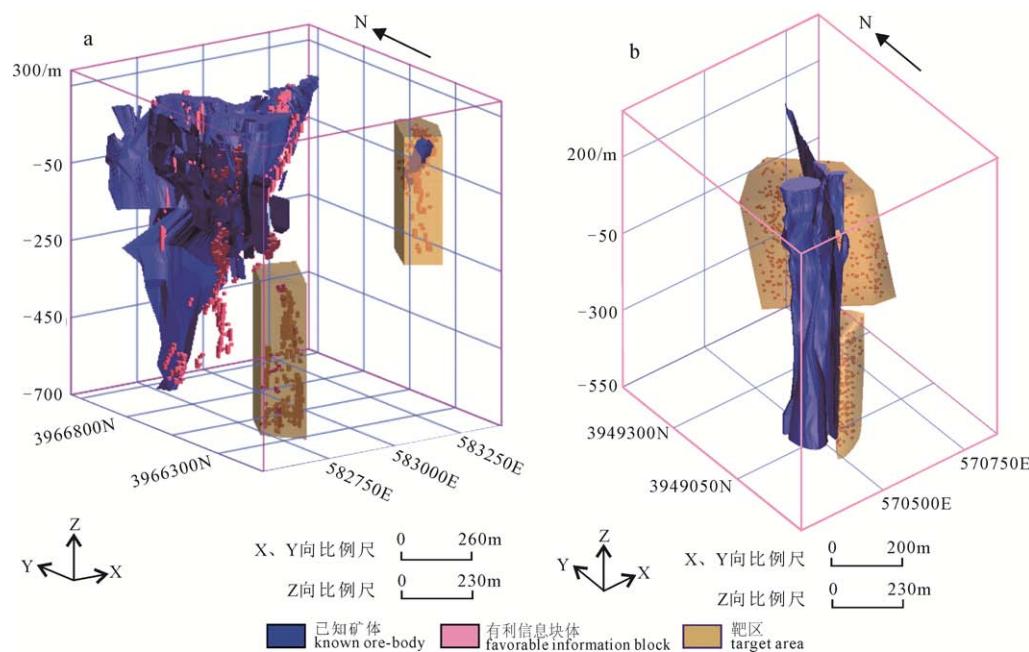


图 6 西峪矿集区(a)、常马研究区(b)找矿靶区预测成果图

Fig. 6 Prediction results of prospecting targets in Xiyu ore concentration area (a) and Changma research area (b)

表 3 西峪、常马矿集区三维信息量分区统计分析表

Table 3 Statistical analysis of 3D information partition in Xiyu and Changma ore concentration area

研究区	信息量值	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
西 峪 矿 集 区	>0	580 529	49 369	0.842 9	0.988 9	1.173 2
	>0.3	388 930	48 112	0.564 7	0.963 7	1.706 5
	>0.6	297 431	46 388	0.431 9	0.929 2	2.151 5
	>0.9	237 497	43 357	0.344 9	0.868 5	2.518 4
	>1.2	183 101	38 402	0.265 9	0.769 2	2.893 3
	>1.5	130 806	30 290	0.189 9	0.606 7	3.194 5
	>1.8	72 436	18 152	0.105 2	0.363 6	3.457 0
	>2.1	37 927	10 094	0.055 1	0.202 2	3.671 5
	>2.4	16 540	4 410	0.024 0	0.088 3	3.678 1
	>2.7	2 306	618	0.003 3	0.012 4	3.697 0
	>3	703	130	0.001 0	0.002 6	2.551 0
常 马 研 究 区	0.474	46 592	619	0.016 0	0.020 4	1.275 0
	0.739	34 837	547	0.012 0	0.018 0	1.500 0
	1.004	28 639	507	0.009 8	0.016 7	1.704 1
	1.269	23 465	424	0.008 1	0.014 0	1.728 4
	1.534	15 204	327	0.005 2	0.010 8	2.076 9
	1.799	12 822	286	0.004 4	0.009 4	2.136 4
	2.063	7 023	208	0.002 4	0.006 9	2.875 0
	2.328	2 796	115	0.001 0	0.003 8	3.941 9
	2.593	2 796	115	0.001 0	0.003 8	3.941 9
	2.858	896	51	0.000 3	0.001 7	5.450 5
	3.123	896	51	0.000 3	0.001 7	5.450 5

圈定 2 处找矿靶区, 分别位于西峪岩管群的南侧和东南侧, 据预测空间展布特征, 为较陡直的管状体的可能性大, 标高范围分别为-400~ -700 m、150~ -300 m(图 6)。

4.4.2 常马矿集区找矿靶区圈定

常马矿集区依据信息量法建立的成矿有利块体

比较分散, 因此采用证据权法与信息量法叠加分析进行成矿预测与靶区圈定。证据权法实质是通过叠加复合分析与矿床形成有关的地学要素来对找矿靶区进行预测, 采用统计分析的方式, 将与矿床形成有关的各个控矿要素都视为证据因子, 证据因子对预测区成矿的重要性由证据权值的大小来确定, 而

成矿有利块体最终由后验概率值确定。首先,计算先验概率:假设研究区划分成了T个单元,含有矿体为D个,那么随机选取某一单元区域含有矿体的概率是: $P_{\text{先验}}=P(D)=D/T$,先验几率为: $O_{\text{先验}}=O(D)=P(D)/[1-P(D)]=D/(1-D)$ 。其次,计算权重值:对于一个单元中,证据因子与已知矿体的关系可能存在以下四种情况: BI D, $\bar{B} I D$, $B I \bar{D}$, $\bar{B} I \bar{D}$,对任意一个证据因子,它的权重被定义为:

$$W^+ = \ln \left\{ \frac{P(B/D)}{P(\bar{B}/D)} \right\}$$

$$W^- = \ln \left\{ \frac{P(\bar{B}/D)}{P(B/\bar{D})} \right\}$$

W^+ 、 W^- 分别表示证据因子存在、不存在时的证据权重值,研究区中若原始数据缺失,则证据权重值为0。最后,计算后验概率值:后验几率: $O_{\text{后验}}=\exp[\ln O_{\text{先验}}+W^+]$ 或 $O_{\text{后验}}=\exp[\ln O_{\text{先验}}+W^-]$,后验概率: $P_{\text{后验}}=O_{\text{后验}}/(1+O_{\text{后验}})$ 。

在单独计算了证据权重法和信息量法两种算法的基础上,选取证据权重法和信息量法成矿有利区间共同约束条件下的块体作为成矿有利块体,在常马研究区圈定成矿靶区2处,其中,靶区1位于胜利I号岩管南东侧,紧邻胜利I-1号隐伏矿体,标高范围与胜利I-1号隐伏矿体一致,为-250~-550 m;靶区2位于胜利I号岩管的北部,标高范围为-50~-550 m(图6)。

4.5 预测评述及建议

借助三维技术进行金刚石原生矿体深部成矿预测,不但预测靶区直观可见,而且预测信息的量化使预测结果更科学可靠。鲁西半个多世纪的勘探工作所积累的丰富资料数据是三维可视化研究的基础和前提,在丰富的数据源中借助三维技术析获构造控矿信息是进行金刚石已知矿体深部成矿预测的关键一步,但受到地质钻孔和剖面数据深度较浅且范围有限的制约,基于此构建的三维地质模型对深部地质结构信息刻画的“深度”和“广度”有一定局限性。鲁西地区钻孔最大深度1027 m,勘探剖面最大深度1050 m,基于此圈定的靶区深度均在1050 m以浅,广度在1 km²以内。地球物理方法是获得深部地质结构信息的有效办法(董树文等,2009),物性反演可有效获取深部地质体或地质界面的分布特征(Portniaguine and Zhdanov, 2002),弥补三维预测在“深度”和“广度”上的不足,鲁西基于综合地球物理方法深部探测深度已达4 km。同时,三维地质数据库以及地质剖面等约束信息可有效减少地球物理数据因重磁场的体积效应、反演方法的欠定性等因素导致的反演结果的多解性。因此,将地球

物理、地质钻孔、地质剖面等多元地质信息有效融合进行三维综合信息成矿预测,可进一步提高深部成矿预测的有效性和可靠性,获得最优预测效果。

5 结论

(1)鲁西地区从构造控矿特征入手进行的三维可视化研究与定量化成矿预测,取得良好预测效果,在西峪和常马矿集区深边部1000 m以浅共圈定4处找矿靶区。在Mitchell建立的金伯利岩浆成矿模式指导下建立金伯利岩管根部带的形态概念以限定预测深度,并借助GIS的空间分析技术现实反映常马和西峪岩管三维地质特征、量化深部变化趋势,在此基础上用体积法预测了常马和西峪岩带深部1600 m以浅金刚石量分别为196.0万ct和679.5万ct,合计875.5万ct。其中,1200 m以浅岩管深部预测金刚石量557.6万ct。鲁西原生矿深部资源潜力大。

(2)鲁西金刚石原生矿田自地表至深部呈现一定的规律性变化。
①自浅部至深部金伯利岩体中角砾含量减少,岩性逐渐单一化。比如常马岩带浅部岩性有镁铝榴石斑状金伯利岩、细粒金伯利岩、金伯利角砾岩等,深部均为镁铝榴石斑状金伯利岩;西峪岩带浅部有金云母斑状金伯利岩、细粒金伯利岩、镁铝榴石斑状金伯利岩和金伯利角砾岩,深部为金云母斑状金伯利岩和含围岩碎屑斑状金伯利岩。
②金刚石粒度无论其浅部粒径的大小和差异性,在深部(垂深600 m以下)粒级范围较稳定,在1.0 mm左右。由前所述,常马岩带金刚石颗粒相对较大、粒径差异亦较大,一般粒径0.5~3.0 mm,但不乏粒径超8 mm重量100 ct以上的大颗粒金刚石;西峪岩带金刚石粒径差异小,多为0.5~1.0 mm,鲜有大于4 mm者。但在两矿带深部选获的20粒金刚石中,粒径均在0.3~1.3 mm之间。
③金伯利岩管规模自地表至深部虽有局部“膨大”,但整体呈缩减趋势,且地表无论常马岩带的2个岩管还是西峪由8个岩管组成的岩管群,在深部一定范围内均向中心聚拢为1个岩管。同时,三维可视化预测结果显示,在岩管附近很可能还有其他隐伏岩管或“盲端”,其产出部位和赋存标高无明显规律性,金伯利岩管根部带的复杂性毋庸置疑。以上规律特征可指导判别金伯利岩管的“相带”部位、规模、形态及含矿性,助力金刚石深部找矿及隐伏矿体预测实现新突破。

致谢:论文撰写过程中得到了山东省地质矿产勘查开发局首席专家宋明春研究员的指导帮助,在此表示诚挚感谢!

Acknowledgements:

This study was supported by Shandong Institute of Geological Survey (No. 1212010813014), Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources (Nos. KY201602, 202011 and 202012), and Department of Science and Technology of Shandong Province (No. 2017CXGC1607).

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(中国地质大学(北京); 北京大学), 21(5): 211-220.
- 程光锁, 刘卫东, 褚志远, 周军, 赵德庆, 胡戈, 梁太涛. 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.
- 褚志远, 王树星, 付帅. 2018. 可控源音频大地电磁测深法在西峪矿区金刚石原生矿找矿中的应用[J]. 山东国土资源, 34(6): 59-64.
- 董树文, 高锐, 吕庆田, 张季生, 张荣华, 薛怀民, 吴才来, 卢占武, 马立成. 2009. 庐江-枞阳矿集区深部结构与成矿[J]. 地球学报, 30(3): 279-284.
- 董振信. 1991. 我国金伯利岩型金刚石矿床的若干地质特征及其找矿标志[J]. 矿床地质, 10(3): 255-264.
- 贺灌之. 1980. 金伯利岩和金刚石的形成机制[J]. 地质论评, 26(5): 384-391.
- 孔庆友, 张天祯, 于学峰, 徐军祥, 潘元林, 李献水. 2006. 山东矿床[M]. 济南: 山东科学技术出版社.
- 李伟, 陈建平, 褚志远, 徐磊. 2020a. 基于三维模型的西峪金伯利岩管与断裂构造关系探讨[J]. 地质学报, 94(9): 2728-2735.
- 李伟, 陈建平, 王焕富, 褚志远, 赵红娟. 2020b. 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.
- 刘天佑. 2007. 地球物理勘探概论[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘彦, 吕庆田, 严加永, 吴明安, 邓光, 邓震. 2012. 庐枞矿集区结构特征重磁研究及其成矿指示[J]. 岩石学报, 28(10): 3125-3138.
- 罗声宣, 任喜荣, 朱源, 陈积银, 郭亚平, 魏同林. 1999. 山东金刚石地质[M]. 济南: 山东科学技术出版社.
- 吕庆田, 侯增谦, 杨竹森, 史大年. 2004. 长江中下游地区的底侵作用及动力学演化模式: 来自地球物理资料的约束[J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 34(9): 783-794.
- 吕庆田, 史大年, 赵金花, 严加永, 徐明才. 2005. 深部矿产勘查的地震学方法: 问题与前景—铜陵矿集区的应用实例[J]. 地质通报, 24(3): 211-218.
- 吕庆田, 杨竹森, 严加永, 徐文艺. 2007. 长江中下游成矿带深部成矿潜力、找矿思路与初步尝试—以铜陵矿集区为实例[J]. 地质学报, 81(7): 865-881.
- 吕青, 焦永鑫, 葛跃进, 肖丙建, 褚志远, 刘淑桢. 2021. 基于红外光谱-拉曼光谱研究山东郯城砂矿的金刚石及包裹体类型[J]. 地球学报, 42(6): 895-906.
- 毛先成, 张苗苗, 邓浩, 邹艳红, 陈进. 2016. 矿区深部隐伏矿体三维可视化预测方法[J]. 地质学刊, 40(3): 363-371.
- 邱君, 吴满路, 范桃园, 张重远, 王连山. 2019. 郯庐断裂带苏鲁界地应力积累特征及地震危险性研究[J]. 地质学报, 93(12): 3249-3258.
- 山东省地质局第七地质队. 1983. 山东省蒙阴县金刚石原生矿床研究报告[R]. 临沂: 山东省地质局第七地质队.
- 山东省地质局第七地质队. 1979. 山东省蒙阴县常马庄金刚石原生矿带普查地质报告[R]. 临沂: 山东省地质局第七地质队.
- 山东省第七地质矿产勘查院, 山东省地质科学研究院. 2020. 隐伏金刚石矿评价理论、方法与预测最终报告[R]. 临沂: 山东省第七地质矿产勘查院.
- 山东省第七地质矿产勘查院. 2012. 山东省金刚石矿资源潜力评价成果报告[R]. 临沂: 山东省第七地质矿产勘查院.
- 山东省国土资源厅. 2014. 关于印发《山东省地层侵入岩构造单元划分方案》的通知[Z]. 济南: 山东省国土资源厅.
- 山东省第七地质矿产勘查院. 2015. 山东省蒙阴县常马矿区金刚石原生矿深部普查报告[R]. 临沂: 山东省第七地质矿产勘查院.
- 山东省第七地质矿产勘查院. 2017a. 山东省蒙阴地区金刚石原生矿成矿规律及深部找矿方法技术研究[R]. 临沂: 山东省第七地质矿产勘查院.
- 山东省第七地质矿产勘查院. 2017b. 山东省蒙阴县西峪地区金刚石原生矿深部及外围普查报告[R]. 临沂: 山东省第七地质矿产勘查院.
- 宋明春, 徐军祥, 王沛成. 2009. 山东省大地构造格局和地质构造演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 宋明春, 余西顺, 宋英昕, 肖丙建, 周登诗, 高存山, 冯爱平. 2020. 山东省鲁西金刚石的类型、源区及区域壳幔演化背景[J]. 地质学报, 94(9): 2606-2625.
- 孙培基. 1993. 论地球物理方法在寻找金刚石原生矿中的作用[J]. 地质科技情报, 12(S1): 2-6.
- 万方来, 蒋金晶, 王煊, 杨献忠, 王怀楚. 2019. 辽宁省瓦房店金伯利岩矿区构造特征及其控矿作用[J]. 地质通报, 38(1): 62-67.
- 王照波, 吕青, 葛跃进, 王庆军. 2013. 论“牛岗构造体系”特征及其对蒙阴金伯利岩带的控制[J]. 山东国土资源, 29(10-11): 1-5.
- 王照波, 王庆军. 2014. 华北板块东缘金刚石成矿区域地质背景分析与成矿预测[J]. 山东国土资源, 30(10): 8-14.
- 吴俊华, 袁承先, 赵赣. 2010. 隐伏矿体的预测理论、探测方法及发展现状[J]. 地质找矿论丛, 25(3): 188-195.
- 武雨飞. 2014. 山东蒙阴胜利一号岩管金伯利岩矿物学特征研究[D]. 北京: 中国地质大学: 6-10.
- 徐志敏, 辛会翠, 李晋, 吕扶君. 2019. 柴达木盆地大柴旦地区盆地中新生代演化机制电性特征分析[J]. 地质学报, 93(12): 3282-3298.
- 薛建玲, 庞振山, 程志中, 陈辉, 贾儒雅. 2020. 深部找矿基本问题及方法[J]. 地质通报, 39(8): 1125-1136.
- 薛迎喜, 贾儒雅, 庞振山, 薛建玲. 2018. 矿产深勘精查可望一箭双雕[N]. 中国矿业报, 2018-11-06(1).
- 严加永, 吕庆田, 孟贵祥, 朱晓颖. 2008a. 三维可视化及物探新技术在矿山接替资源勘查中的应用——以铜陵狮子山矿田为例[J]. 地球学报, 29(1): 116-120.
- 严加永, 滕吉文, 吕庆田. 2008b. 深部金属矿产资源地球物理勘查与应用[J]. 地球物理学进展, 23(3): 871-891.
- 尹作为, 路凤香, 陈美华, 徐红卉. 2005. 山东蒙阴金刚石的形

- 成时代及地质环境[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 12(4): 614-621.
- 于学峰, 张天祯, 王虹. 2015. 山东矿床成矿系列[M]. 北京: 地质出版社.
- 袁峰, 李晓晖, 张明伟, 周涛发, 高道明, 洪东良, 刘晓明, 汪启年, 朱将波. 2014. 隐伏矿体三维综合信息成矿预测方法[J]. 地质学报, 88(4): 630-643.
- 翟裕生, 邓军, 王建平, 彭润民, 刘家军, 杨立强. 2004. 深部找矿研究问题[J]. 矿床地质, 23(2): 142-149.
- 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.
- 张德会, 徐九华, 余心起, 李健康, 毛世德, 王科强, 李泳泉. 2011. 成岩成矿深度: 主要影响因素与压力估算方法[J]. 地质通报, 30(1): 112-125.
- 张培强. 2006. 山东金伯利岩岩管成因[D]. 北京: 中国地质大学: 24-29.
- 赵建军, 李靖, 王书, 戴军. 2011. 辽宁瓦房店金刚石矿集区区域成矿控制条件及资源潜力预测[J]. 地质与资源, 20(1): 40-44.
- 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—武汉地质学院学报, (4): 107-121.
- 赵鹏大, 张寿庭, 陈建平. 2004. 危机矿山可接替资源预测评价若干问题探讨[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 31(2): 111-117.
- 赵鹏大. 2007. 成矿定量预测与深部找矿[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 14(5): 1-10.
- 郑建平, 路凤香, 叶德隆. 1989. 辽东半岛南部金伯利岩成因讨论[J]. 辽宁地质, (4): 321-333.
- 郑建平, 周新华. 2013. 华北岩石圈地幔岩石学研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 32(4): 392-401.
- 郑永飞, 徐峥, 赵子福, 戴立群. 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏[J]. 中国科学: 地球科学, 48(4): 379-414.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. 中国科学: 地球科学, 41(5): 583-592.
- 庄德厚. 1984. 辽南地区金刚石原生矿床地质特征及其形成机制探讨[J]. 辽宁地质, (1): 63-80.
- 曾普胜, 李睿哲, 刘斯文, 温利刚, 赵九江, 王十安. 2021. 中国东部燕山期大火成岩省: 岩浆-构造-资源-环境效应[J]. 地球学报, 42(6): 721-748.

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 (China University of Geosciences(Beijing); Peking University), 21(5): 211-220(in Chinese with English abstract).
- CHENG Guang-suo, LIU Wei-dong, CHU Zhi-yuan, ZHOU Jun, ZHAO De-qing, HU Ge, LIANG Tai-tao. 2020. Deep comprehensive geophysical characteristics and significance of the Xiyu kimberlites in the Mengyin County, Shandong Province[J]. Acta Geologica Sinica, 94(9): 2772-2782(in Chinese with English abstract).
- with English abstract).
- CHU Zhi-yuan, WANG Shu-xing, FU Shuai. 2018. Application of controlled source audio magnetotelluric method in prospecting diamond primary ores in Xiyu mining area[J]. Shandong Land and Resources, 34(6): 59-64(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen, GAO Rui, LÜ Qing-tian, ZHANG Ji-sheng, ZHANG Rong-hua, XUE Huai-min, WU Cai-lai, LU Zhan-wu, MA Li-cheng. 2009. Deep structure and ore-forming in Lujiang-Zongyang ore concentrated area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(3): 279-284(in Chinese with English abstract).
- DONG Zhen-xin. 1991. Some geological characteristics of kimberlite type diamond deposits in China and their ore-prospecting indicators[J]. Mineral Deposits, 10(3): 255-264(in Chinese with English abstract).
- Department of Land and Resources of Shandong Province. 2014. Division scheme of strata, intrusive rocks and tectonic units in Shandong Province[Z]. Jinan: Department of land and resources of Shandong Province(in Chinese).
- FIELD M, STIEFENHOFER J, ROBEY J, KURSZLAUKIS S. 2007. Kimberlite-hosted diamond deposits of southern Africa: A review[J]. Ore Geology Reviews, 34(1): 33-75.
- HE Guanzhi. 1980. Mechanism of formation of kimberlite and diamond[J]. Geological Review, 26(5): 384-391(in Chinese).
- HAGGERTY S E. 1986. Diamond genesis in a multiply-constrained model[J]. Nature, 320: 34-38.
- JIANG Guo-ming, ZHANG Gui-bin, LÜ Qing-tian, SHI Da-nian, YAO Xu. 2013. 3-D velocity model beneath the Middle-Lower Yangtze River and its implication to the deep geodynamics[J]. Tectonophysics, 606: 36-47.
- KONG Qing-you, ZHANG Tian-zhen, YU Xue-feng, XU Jun-xiang, PAN Yuan-lin, LI Xian-shui. 2006. Shandong deposit[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press(in Chinese).
- LI Wei, CHEN Jian-ping, CHU Zhi-yuan, XU Lei. 2020a. A discussion on the relationship between Xiyu kimberlite pipe and regional tectonic characteristics[J]. Acta Geologica Sinica, 94(9): 2728-2735(in Chinese with English abstract).
- LI Wei, CHEN Jian-ping, WANG Huan-fu, CHU Zhi-yuan, ZHAO Hong-juan. 2020b. 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 Tian-you. 2007. Introduction to geophysical exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- LIU Yan, LÜ Qing-tian, YAN Jia-yong, WU Ming-an, QI Guang, DENG Zhen. 2012. The structure of Luzong ore district and its metallogenetic indication from gravity and magnetic information[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(10): 3125-3138(in Chinese with English abstract).
- LUO Sheng-xuan, REN Xi-rong, ZHU Yuan, CHEN Ji-chang, GUO Ya-ping, WEI Tong-lin. 1999. Diamond geology in Shandong[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press(in Chinese).
- LÜ Qing-tian, HOU Zeng-qian, YANG Zhu-sen, SHI Da-nian. 2004.

- Underplating and dynamic evolution model in the middle and lower reaches of the Yangtze River: constraints from geo-physical data[J]. Science in China Series D Earth Sciences, 34(9): 783-794(in Chinese).
- LÜ Qing-tian, SHI Da-nian, ZHAO Jin-hua, YAN Jia-yong, XU Ming-cai. 2005. Seismic method for deeper mineral exploration: Problems and prospects—A case of the Tongling ore district[J]. Geological Bulletin of China, 24(3): 211-218(in Chinese with English abstract).
- LÜ Qing-tian, YANG Zhu-sen, YAN Jia-yong, XU Wen-yi. 2007. The metallogenetic potential, prospecting idea and primary attempt in depth of the ore belt of the middle and lower reach of the Yangtze River—A case study of Tongling ore district[J]. Acta Geologica Sinica, 81(7): 865-881(in Chinese with English abstract).
- LÜ Qing, JIAO Yong-xin, GE Yue-jin, XIAO Bing-jian, CHU Zhi-yuan, LIU Shu-zhen. 2021. A Study of Types of Diamonds and Inclusions in Tancheng Placer of Shandong Province Based on Infrared and Raman Spectroscopy[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(6): 895-906(in Chinese with English abstract).
- MAO Xian-cheng, ZHANG Miao-miao, DENG Hao, ZOU Yan-hong, CHEN Jin. 2016. Three-dimensional visualization prediction method for concealed ore bodies in deep mining areas[J]. Journal of Geology, 40(3): 363-371(in Chinese with English abstract).
- MITCHELL R H. 1986. Kimberlites: Mineralogy, geochemistry and petrology[M]. New York: Plenum Press.
- PORTRNIAGUINE O, ZHDANOV M S. 2002. 3-D magnetic inversion with data compression and image focusing[J]. Geophysic, 67(5): 1532-1541.
- QIU Jun, WU Man-lu, FAN Tao-Yuan, ZHANG Chong-yuan, WANG Lian-shan. 2019. Stress accumulation characteristics and seismic hazard study in the junction of Jiangsu and Shandong Provinces of the Tanlu fault zone[J]. Acta Geologica Sinica, 93(12): 3249-3258(in Chinese with English abstract).
- RUSSELL J K, SPARKS R S J, KAVANAGH J L. 2019. Kimberlite volcanology: Transport, ascent, and eruption[J]. Elements, 15(6): 405-410.
- SMIT K V, SHIREY S B. 2019. Kimberlites: Earth's diamond delivery system[J]. Gems & Gemology, 55(2): 270-276.
- SONG Ming-chun, XU Jun-xiang, WANG Pei-cheng. 2009. Geotectonic patterns and geological tectonic evolution in Shandong Province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- SONG Ming-chun, YU Xi-shun, SONG Ying-xin, XIAO Bing-jian, ZHAO Deng-shi, GAO Cun-shan, FENG Ai-ping. 2020. Types, sources, and regional crust-mantle evolution background of diamonds in the western Shandong Province[J]. Acta Geologica Sinica, 94(9): 2606-2625(in Chinese with English abstract).
- SUN Pei-ji. 1993. The role of geophysical methods in primary diamond deposit prospecting[J]. Geological Science and Technology Information, 12(S1): 2-6(in Chinese with English abstract).
- The 7th Geological Team of Shandong Geology Bureau. 1983. Research report on primary diamond deposits in Mengyin County, Shandong Province[R]. Linyi: The 7th Geological Team of Shandong Geology Bureau(in Chinese).
- The 7th Geological Team of Shandong Geology Bureau. 1979. Geological survey report of Changmazhuang diamond primary ore belt in Mengyin County, Shandong Province[R]. Linyi: The 7th Geological Team of Shandong Geology Bureau(in Chinese).
- The 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province. 2020. Final report on evaluation theory, method and prediction of concealed diamond deposits [R]. Linyi: The 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province(in Chinese).
- The 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province. 2012. Evaluation results report of diamond resource potential in Shandong Province [R]. Linyi: The 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province(in Chinese).
- The 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province. 2015. Survey Report on deep of primary diamond ore in Changma mining area, Mengyin County, Shandong Province[R]. Linyi: The 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province(in Chinese).
- The 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province. 2017a. Study on metallogenetic law and deep prospecting methods and technology of diamond primary ore in Mengyin area, Shandong Province [R]. Linyi: The 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province(in Chinese).
- The 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province. 2017b. General survey report on deep and peripheral diamond primary ore in Xiyu area, Mengyin County, Shandong Province[R]. Linyi: The 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province(in Chinese).
- WAN Fang-lai, JIANG Jin-jing, WANG Xuan, YANG Xian-zhong, WANG Huai-chu. 2019. Geological characteristics and structural ore-control role in Wafangdian kimberlite orefield of Liaoning Province[J]. Geological Bulletin of China, 38(1): 62-67(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhao-bo, LÜ Qing, GE Yue-jin, WANG Qing-jun. 2013. Study on characteristics of “Niulan structure” and its constraints on Mengyin kimberlite belt[J]. Shandong Land and Resources, 29(10-11): 1-5(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhao-bo, WANG Qing-jun. 2014. Analysis on regional geological background and metallogenetic prediction of diamond mineralization in eastern margin of North China plate[J]. Shandong Land and Resources, 30(10): 8-14(in Chinese with English abstract).
- WU Jun-hua, YUAN Cheng-xian, ZHAO Gan. 2010. Research technique and progress on prognosis of concealed ore body[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 25 (3): 188-195(in Chinese with English abstract).
- WU Yu-fei. 2014. The study on Shengli No.1 pipe Mengyin Shandong kimberlite mineralogical characteristics[D]. Beijing: China University of Geosciences: 6-10(in Chinese with English abstract).

- WILSON L., HEADAD III J W. 2007. An integrated model of kimberlite ascent and eruption[J]. *Nature*, 447(7140): 53-57.
- XU Zhi-min, XIN Hui-cui, LI Jin, LÜ Fu-jun. 2019. Electrical characteristics analysis of Mesozoic and Cenozoic evolution mechanisms of basins in the Dachaidan area, Qaidam Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(12): 3282-3298(in Chinese with English abstract).
- XUE Jian-ling, PANG Zhen-shan, CHENG Zhi-zhong, CHEN Hui, JIA Ru-ya. 2020. Basic problems and methods of deep mineral exploration[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(8): 1125-1136(in Chinese with English abstract).
- XUE Ying-xi, JIA Ru-ya, PANG Zhen-shan, XUE Jian-ling. 2018. Deep exploration and fine investigation of minerals is expected to kill several birds with one stone[N]. *China Mining News*, 2018-11-06(1)(in Chinese).
- YAN Jia-yong, LÜ Qing-tian, MENG Gui-xiang, ZHU Xiao-ying. 2008a. Application of 3D visualization technique for ore deposit and new geophysical technology to the exploration of mine substitution resources: A case study of the Tongling-Shizishan ore field[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(1): 116-120(in Chinese with English abstract).
- YAN Jia-yong, TENG Ji-wen, LÜ Qing-tian. 2008b. Geophysical exploration and application of deep metal ore resources[J]. *Progress in Geophysics*, 23(3): 871-891(in Chinese with English abstract).
- YIN Zuo-wei, LU Feng-xiang, CHEN Mei-hua, XU Hong-yi. 2005. Ages and environments of formation diamonds in Mengyin County, Shandong Province[J]. *Earth Science Frontiers* (China University of Geosciences(Beijing); Peking University), 12(4): 614-621(in Chinese with English abstract).
- YU Xue-feng, ZHANG Tian-zhen, WANG Hong. 2015. Metallogenetic series of deposits in Shandong[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- YUAN Feng, LI Xiao-hui, ZHANG Ming-ming, ZHOU Tao-fa, GAO Dao-ming, HONG Dong-liang, LIU Xiao-ming, WANG Qi-nian, ZHU Jiang-bo. 2014. Three dimension prospectivity modelling based on integrated geoinformation for prediction of buried orebodies[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(4): 630-643(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Yu-sheng, DENG Jun, WANG Jian-ping, PENG Run-min, LIU Jia-jun, YANG Li-qiang. 2004. Rearches on deep ore prospecting[J]. *Mineral Deposits*, 23(2): 142-149(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Cheng-ji, TIAN Jing-xiang, CHEN Wen-tao, ZHANG Zeng-qi, DU Sheng-xian. 2020. The magmatic intrusive sequence and the metallogenetic model of diamondiferous kimberlite in the Mengyin area, western Shandong[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(9): 2666-2675(in Chinese with English abstract).
- ZHANG De-hui, XU Jiu-hua, YU Xin-qi, LI Jian-kang, MAO Shi-de, WANG Ke-qiang, LI Yong-quan. 2011. The diagenetic and metallogenetic depth: main constraints and the estimation methods[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(1): 112-125(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Pei-qiang. 2006. Origin of kimberlitic pipes in Shandong Province[D]. Beijing: China University of Geosciences: 24-29(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Jian-jun, LI Jing, WANG Shu, DAI jun. 2011. The regional ore-controlling conditions and prediction of resources potential of the diamond concentrated district in Wafangdian, Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 20(1): 40-44(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 Sciences — Journal of Wuhan College of Geology*, (4): 107-121(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Peng-da, ZHANG Shou-ting, CHEN Jian-ping. 2004. Discussion on prediction and appraisement of replaceable resources of crisis mine[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(2): 111-117(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Peng-da. 2007. Quantitative mineral prediction and deep mineral exploration[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences(Beijing); Peking University)*, 14(5): 1-10(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Jian-ping, LU Feng-xiang, YE De-long. 1989. The genesis of kimberlite from S. Liaodong Peninsula[J]. *Liaoning Geology*, (4): 321-333(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Jian-ping, ZHOU Xin-hua. 2013. Research progress on petrology of the lithospheric mantle in North China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(4): 392-401(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Yong-fei, XU Zheng, ZHAO Zi-fu, DAI Li-qun. 2018. Mesozoic mafic magmatism in North China: Implications for thinning and destruction of cratonic lithosphere[J]. *Science China Earth Sciences*, 48(4): 379-414(in Chinese).
- ZHU Ri-xiang, CHEN Ling, WU Fu-yuan, LIU Jun-lai. 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 4(5): 583-592(in Chinese).
- ZHUANG De-hou. 1984. Geological characteristics and formation mechanism of primary diamond deposits in southern Liaoning[J]. *Liaoning Geology*, (1): 63-80(in Chinese).
- ZENG Pu-sheng, LI Rui-zhe, LI Si-wen, WEN Li-gang, ZHAO Jiu-jiang, WANG Shi-an. 2021. Yanbian Large Igneous Provinces in Eastern China: Magmatism-Tectonics-Resources-Environment Effects[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(6): 721-748(in Chinese with English abstract).