



物探在金伯利岩型原生金刚石矿勘查中的应用 ——以辽宁瓦房店金刚石矿田为例

李祎昕¹, 蒋丽丽¹, 万方来², 张国仁³, 徐 华², 仲米山³, 付海华⁴

1. 辽宁省物测勘察院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110121;

2. 辽宁省第六地质大队有限责任公司, 辽宁 大连 116200;

3. 辽宁省地质勘察院有限责任公司, 辽宁 大连 116100;

4. 辽宁省第三地质大队有限公司, 辽宁 朝阳 122000

摘 要: 辽宁瓦房店金刚石矿田是我国重要的金伯利岩型金刚石矿集区。为了更好地发挥物探在该区寻找金刚石矿的作用, 对以往物探工作程度、使用的方法、取得的成果进行了系统梳理。通过总结发现, 地面磁测在圈定浅地表金伯利岩体中发挥了重要作用; 在寻找深部隐伏金伯利岩体时, 音频大地电磁测量、井中物探发挥了重要作用; 在研究金刚石矿控矿因素等问题时, 1:5 万区域重力测量、大地电磁剖面测量发挥了重要作用。总之, 物探是瓦房店矿田金刚石矿勘查中的重要组成部分, 合理的方法组合能够解决相应的地质问题。

关键词: 金伯利岩; 金刚石矿; 物探; 隐伏岩体; 辽宁省

GEOPHYSICAL EXPLORATION FOR KIMBERLITE-TYPE PRIMARY DIAMOND DEPOSITS: A Case Study of Wafangdian Diamond Orefield in Liaoning Province

LI Yi-xin¹, JIANG Li-li¹, WAN Fang-lai², ZHANG Guo-ren³, XU Hua², ZHONG Mi-shan³, FU Hai-hua⁴

1. Liaoning Geophysical Measuring Exploration Institute Co., Ltd., Shenyang 110121, China;

2. Liaoning No. 6 Geological Brigade Co., Ltd., Dalian 116200, Liaoning Province, China;

3. Liaoning Institute of Geological Exploration Co., Ltd., Dalian 116100, Liaoning Province, China;

4. Liaoning No. 3 Geological Brigade Co., Ltd., Chaoyang 122000, Liaoning Province, China

Abstract: The diamond orefield in Wafangdian of Liaoning Province is an important kimberlite-type diamond concentration area in China. The work degree, methods and achievements of previous geophysical prospecting are systematically analyzed so as to better apply geophysical prospecting for diamond deposits in the area. It is concluded that ground magnetic survey plays an important role in delineating shallow-surface kimberlite rock mass; audio magnetotelluric (AMT) survey and borehole geophysical exploration in the search for deep concealed kimberlite rock mass; while the 1:50 000 regional gravity survey and magnetotelluric profile survey, in the study of ore-controlling factors of diamond deposits. To sum up, geophysical prospecting is an important part of diamond exploration in Wafangdian orefield and reasonable combination of methods can solve corresponding geological problems.

Key words: kimberlite; diamond deposit; geophysical prospecting; concealed rock body; Liaoning Province

收稿日期:2021-11-29;修回日期:2021-12-22. 编辑:张哲.

基金项目:辽宁省财政资金项目“瓦房店金刚石整装勘查区增储示范工程——辽宁省瓦房店地区金刚石成矿带区域物探工作”(LNZC2019-0078-1[1]).

作者简介:李祎昕(1988—),女,硕士,工程师,主要从事地球物理、遥感研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区宁山中路 42 号羽丰大厦 1706,E-mail//875298227@qq.com

0 引言

辽宁省南部的瓦房店金刚石矿田是我国重要的金刚石矿分布区,区内金刚石矿均为金伯利岩型。从1971年发现第一个金伯利岩体以来,该区已发现超过100个金伯利岩体,提交了4个大型和1个中型原生金伯利岩型金刚石矿床以及3个近源小型金刚石砂矿床。长期以来,专家学者对瓦房店金刚石矿田的金伯利岩做了大量研究工作^[1-11],认为该区金伯利岩体的岩浆来源深度约为215 km,沿着一定宽度的裂隙快速上侵而形成目前所见的金伯利岩^[1],侵位时间约为465 Ma^[2]。金伯利岩受断裂构造控制,岩管产出于构造交汇部位^[3],金伯利岩的分布与构造盆地有关^[4]。瓦房店金刚石矿田存在对金伯利岩体造成破坏的逆冲推覆构造^[5]。此外,还有一些学者对山东等地寻找、评价金伯利岩时所使用的物探方法进行了研究^[12-18],探索金伯利岩物化探找矿模式、勘探方法。本文通过对瓦房店金刚石矿田50年来金刚石找矿过程中的物探工作进行系统梳理和总结,研究在勘探不同阶段解决不同地质问题时物探发挥的作用。

1 金刚石矿田地质特征

瓦房店金刚石矿田大地构造位置处于华北陆块辽东新元古代-古生代拗陷带,总面积约4 000 km²。矿田东侧出露有新太古界片麻岩,西侧出露古元古界、新元古界、古生界及中生界,在沟谷中发育新生界。其中,新元古界分布面积约占全区总面积的60%。

已发现的金伯利岩体主要集中在矿田中部长约33 km、宽约15 km的范围内(称为矿田核心区),这个区内分布有114个金伯利岩体,其中24个为岩管。矿田北部,在矿田核心区西北侧27 km处发现7个疑似金伯利岩体。这些金伯利岩以前被划分成4个矿带,从岩体分布特征也可划分为岩群区、岩带区和单岩体区。岩群区金伯利岩成群、成簇分布,仅有少量单独的金伯利岩体;岩带区金伯利岩相距较近,平面上呈明显的带状分布;单岩体区,虽然局部也有相距较近的金伯利岩体,但不具备岩群或岩带的特征(见图1)。

研究区金伯利岩与围岩之间存在一定的物性差异。在一定条件下,物探可以在发现和评价金伯利岩时发挥作用,但也有局限性。辉绿岩与金伯利岩磁性相近,粉砂岩和页岩的电阻率与金伯利岩相近,金伯利

岩与其他岩性的密度之间没有明显的差异,而且金伯利岩体的规模相对较小。

2 研究区物探工作程度

瓦房店金刚石矿田物探工作程度非常高,截至2020年底,1:20万重力和1:10万航磁覆盖全区,先后还开展过1:5万航磁放测量(覆盖矿田88%的范围)、两次1:2.5万航磁测量(面积分别为2 477 km²、740 km²,覆盖了矿田核心区)、1:1.5万航磁998 km²、1:1万航磁1 000 km²。中大比例尺地面物探工作有1:5万重力测量600 km²、1:5万地磁测量400 km²、1:1万重力测量30 km²、1:1万地磁测量270 km²、1:5000地磁测量396 km²、1:2000地磁测量107 km²和1:1000地磁测量5 km²。重、磁、大地电磁测深(MT)综合剖面100 km,音频大地电磁测量(AMT)剖面34.85 km。这些工作很多是在发现金伯利岩后进行的,除1:10万航磁和1:20万重力外,其他地面物探和大于等于1:2.5万的航磁则是为了研究金刚石成矿地质条件和控矿因素以及寻找金伯利岩体而进行的,这些工作为金刚石找矿发挥了重要作用。近些年,还在重点区开展了一些井中物探工作。

3 寻找金伯利岩时的物探工作

瓦房店金刚石矿田金刚石找矿初期最主要的方法组合是水系重砂、地面磁法和钻探。水系重砂测量旨在发现与金伯利岩有关的指示矿物,如镁铝榴石、铬铁矿等,最直接的指示矿物是金刚石。发现指示矿物异常后,地质路线调查或面积性地质填图辅以地面磁测是最常用的方法组合。在这个阶段,磁测比例尺以1:2000为主,网度20 m×10 m,局部1:1000,网度10 m×5 m,磁测工作部署在成矿地质条件好或者地表覆盖比较严重的地段,并利用钻探、槽探对发现的磁异常进行工程验证。由于金伯利岩大多分布在局部负地形之中,地表残坡积厚度一般都很大,因此对磁异常的验证以钻探工作为主,槽探工作为辅。在20世纪70年代,也就是本区发现金伯利岩的初期,也尝试开展过一些电法剖面工作,但找矿效果不明显,因此逐渐不再采用。航磁资料显示,虽然本区较大的30号和42号岩管在大于1:5万比例尺的航磁结果中均有明显的异常反映,但航磁的作用更多地是用于筛选靶区和解决

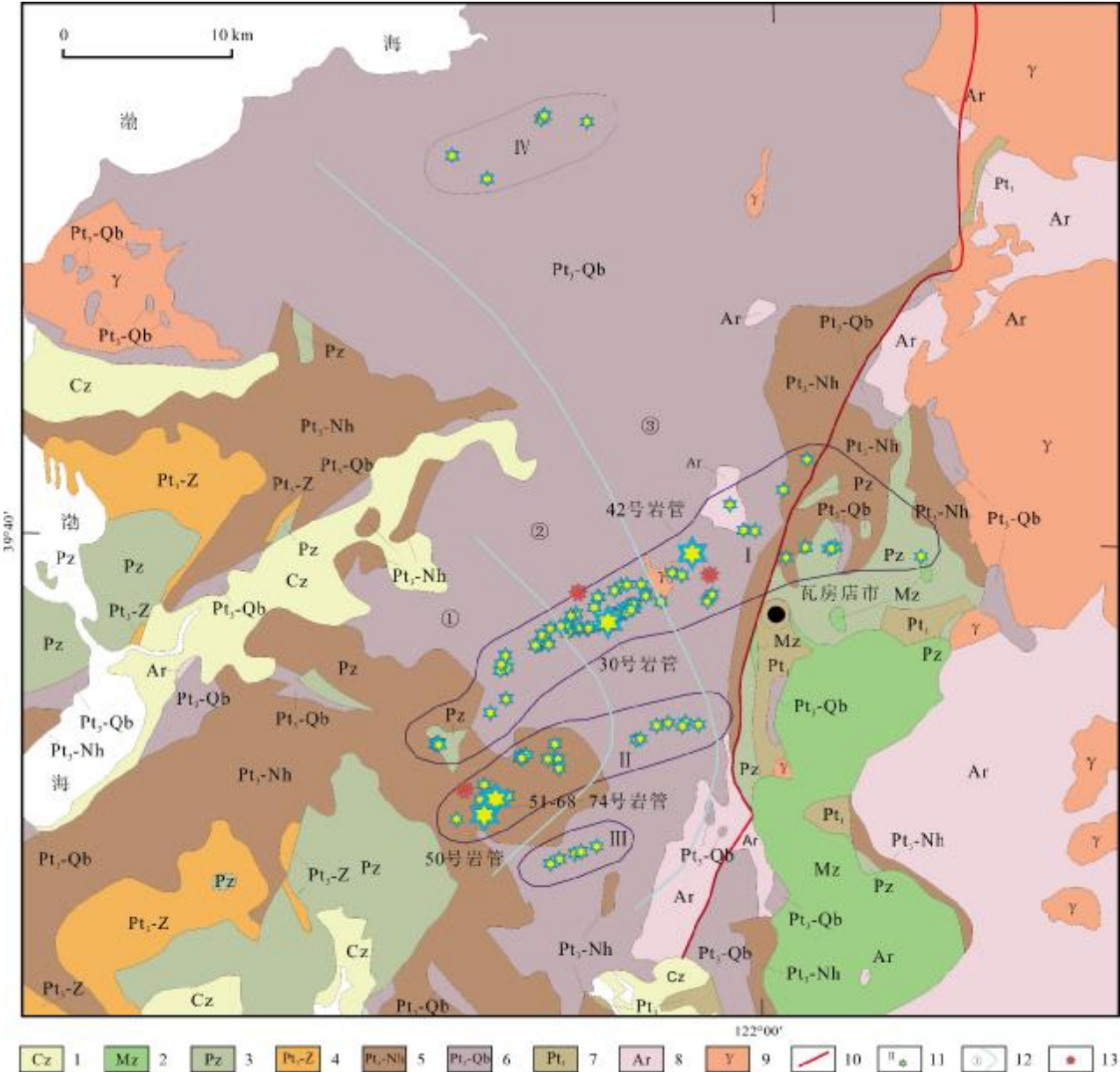


图 1 瓦房店金刚石矿田地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of Wafangdian diamond orefield

1—新生界(Cenozoic); 2—中生界(Mesozoic); 3—古生界(Paleozoic); 4—新元古界震旦系(Neoproterozoic Sinian); 5—新元古界南华系(Neoproterozoic Nanhua Sys.); 6—新元古界青白口系(Neoproterozoic Qingbaikouan Sys.); 7—古元古界(Paleoproterozoic); 8—太古宙片麻岩(Archean gneiss); 9—中酸性侵入体(acid-intermediate intrusion); 10—金州断裂(Jinzhou fault); 11—金伯利岩体及矿带编号(kimberlite and ore belt number); 12—金伯利岩分区及编号(kimberlite zonation and number); 13—金刚石砂矿床(diamond placer)

基础地质问题, 目前还没有通过航磁异常找到新的金伯利岩体.

地磁测量是本区寻找金伯利岩时效果最好的物探方法, 4 个大型原生金刚石矿床在发现和评价过程均开展了大量的地磁测量工作.

3.1 50 号岩管发现过程中的磁法工作

50 号岩管是本区最重要的金伯利岩管, 也是区内

已经开发利用的大型原生金刚石矿床. 该岩管以宝石级金刚石占比高、质量好而享誉国内外珠宝界. 该岩管于 1974 年 5 月发现, 找矿过程中先是在水系重砂中发现了金刚石及伴生矿物含铬镁铝榴石和铬铁矿, 继而为寻找原生的金伯利岩体开展了 2.2 km² 的 1:2000 地面磁测工作. 用混合改正的方法进行室内资料整理, 发现 4 处强度不大、低缓孤立的 ΔZ 异常. 其中一

个呈近东西向展布,长轴 160 m,短轴 50 m.东端为 60~100 nT,西端 300~800 nT,极大值位于西部,达 1500 nT.经山地工程揭露证实为 50 号金伯利岩管引起的异常,以 50 nT 圈定的范围与岩管地表出露的范围基本一致.在 50 号岩管东北部有一处异常极大值为 150 nT、范围不到 80 m 的近等轴状小异常,经山地工程证实也是由金伯利岩引起的异常,该岩体即为 51 号岩管.经后续工作,在 51 号岩管西侧相继发现了 68 和 74 号岩管,但没有明显的磁异常显示.这 3 个小岩管组合在一起构成了一个大型原生金刚石矿床.另外两个呈北西走向的异常,经验证为辉绿岩体引起的异常(见图 2a).

3.2 42 号岩管发现过程中的磁法工作

42 号岩管是目前我国平面面积最大的金伯利岩体,发现于 1972 年 11 月.该岩管地表为浮土掩盖,普查初期在冲沟里发现了 0.5 m² 的金伯利岩露头.为了解岩体形态与规模,进行了 0.22 km² 的 1:1000 磁测工作,圈出一大一小两个椭圆形异常,形态较为规整.大异常的长轴 340 m,短轴 150 m;小异常的长轴 220 m,短轴 110 m.两个异常近东西向展布,强度 300~1 000 nT,极大值达 1 700 nT.北侧出现范围不大、强度不高的负异常.经山地工程验证,这两个异常由 42-1 和 42-2 金伯利岩管引起.在 42 号岩管的找矿过程中,用磁法圈定和寻找金伯利岩取得了很好的效果(见图 2b).

3.3 30 号岩管发现过程中的磁法工作

30 号岩管是 1972 年 10 月发现的.矿区先后开展了多次磁法工作,首次工作是 0.5 km² 的 1:2000 磁测工作,网度 20 m×10 m,圈出一个长轴北东 70°、强度为 400 nT 的长椭圆状异常, ΔZ 最大值达 900 nT.由于岩性不均匀,异常呈现多峰值,北侧伴有 -100 nT 左右的负异常.磁测中等精度,混合改正,均方误差一般小于 15 nT.正异常等值线具南疏北密特征,推测岩体倾向南东.经钻探验证,南东方向的见矿深度逐渐加深,与磁测结果基本吻合.而后,在 30 号岩管矿区又相继开展了多次 1:1000 或 1:2000 地磁测量工作,为了解磁异常细节特征获得了更多的资料.根据矿区详查报告,30 号岩管被分成浅部的 30-1 和深部的 30-2 两个岩体,认为岩管是倾斜展布的.后来根据钻孔资料进行了三维建模,认为 30 号岩管是被推覆构造错断成多段^[19],各段的埋深从地表出露的北西端向南东逐渐加深,由于断距不大,总体上岩管还是相连的,所以磁测结果显示异常等值线南疏北密特征.总体来看,1:2000 磁测圈定出了岩管形态和范围.

4 基础地质研究中的物探工作

瓦房店金刚石矿田金伯利岩体的直接围岩主要是青白口系钓鱼台组石英砂岩,南芬组泥灰岩、页岩;南华系桥头组页岩、粉砂岩.少部分为寒武系,个别岩体的围岩为片麻岩(见图 1).这些岩体主要分布在 1:5

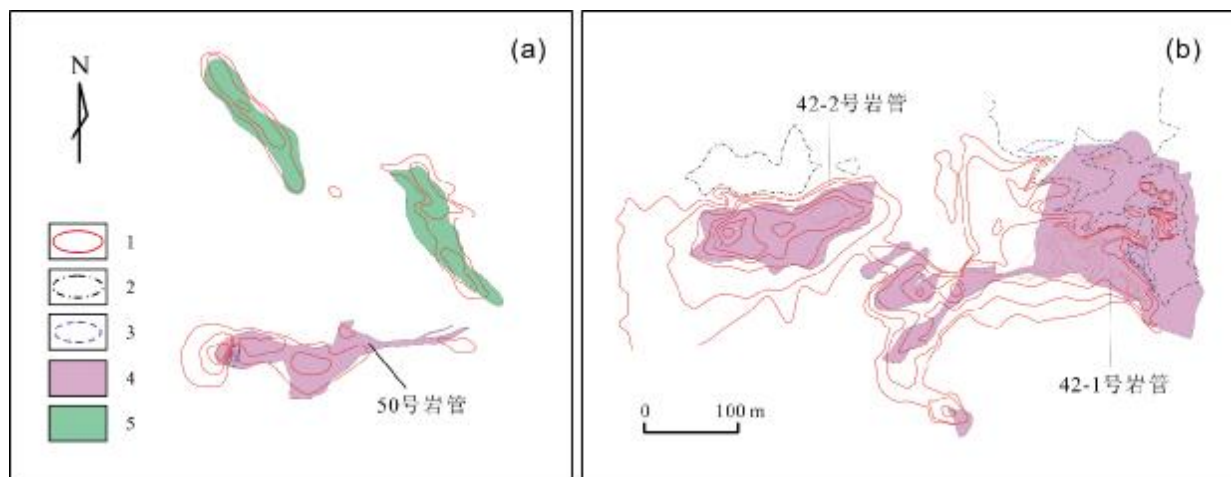


图 2 50 号、42 号岩管地磁异常图

Fig. 2 Geomagnetic anomaly maps of Nos. 50 and 42 kimberlite pipes

1— ΔZ 正值线(positive ΔZ line); 2— ΔZ 零值线(zero ΔZ line); 3— ΔZ 负值线(negative ΔZ line); 4—金伯利岩(kimberlite); 4—辉绿岩(diabase)

万瓦房店幅内,该图幅面积只占全区的10%而分布了约87%已知的金伯利岩体。为了研究这个区域内的新元古代盆地形态等问题,开展了1:5万重力测量、航磁资料解译和重磁电综合剖面测量。通过这些工作,对研究区内基底形态有了新的认识,认为区内基底总体上西深东浅,基底界面局部有起伏但波动幅度不大,基底最深可达2 000~3 000 m。

推覆构造是本区影响金伯利岩形态的重要因素,由于南芬组二段泥灰岩密度大于其他岩性层,在研究推覆构造的特征时,区域重力资料起了很大的作用。布格重力异常显示在基本未受推覆构造破坏的42号岩管附近,几乎没有明显的局部重力异常;受破坏但断距不大的30号岩管附近,可以判读出存在局部重力异常;在被推覆构造错断了的50号岩管附近则分布有明显的局部重力高和重力低异常。重力测量剖面反演结果也显示,50号岩管附近的南芬组二段泥灰岩折曲程度明显大于其他地段。这些结果为认识和研究推覆构造特征提供了依据。

航磁资料解译结果对研究断裂构造特征起到一定作用。MT测量结果对了解盆地基底形态和断裂构造分布提供了基础信息资料。

5 深部找矿时的物探工作

与同矿田的30号、42号岩管相比,50号岩管的延深明显过小。研究认为该岩管被推覆构造错断了,其深部还有巨大的找矿潜力^[20]。为寻找50号岩管被错断的部分,开展了由三维地质填图、物探、钻探等内容组成的深部找矿工作,50号岩管东侧是工作重点区。物探工作主要是音频大地电磁测量和井中物探。通过三维地质填图确认了研究区存在推覆构造^[5]。AMT测量结果在50号岩管东侧发现2个位于页岩、粉砂岩低阻异常区内的中等电阻率异常,随后对这两个异常进行了钻探验证。距离50号岩管1 070 m的2号异常位于重点找矿靶区之内(图3),但钻探结果并未在预想位置见到异常体。通过井中物探发现,在验证2号异常的钻孔300 m孔深附近,地磁场垂直分量与水平分量见中等强度异常,而磁化率和视电阻率反映孔内岩石磁性和电性的两个参数均未见异常,钻孔所见为无磁性的页岩、粉砂岩,推测井旁边有磁性体。该异常在预测的找矿靶区之内,因此在该钻孔旁边布设了50 m×

20 m网度的AMT加密测量剖面,在NL3剖面深度300~350 m处出现视电阻率等值线畸变(图4),与井中磁测异常的深度相似,距离原钻孔约60 m。对这个微弱异常进行钻探验证,于277.52~286.92 m钻遇9.40 m角砾状金伯利岩,从而发现了50-1号金伯利岩体,并在送检磨制薄片的岩心标本中发现1粒-0.5~+0.2 mm的金刚石,说明该岩体具有良好的含矿性,实现了深部找矿的突破。

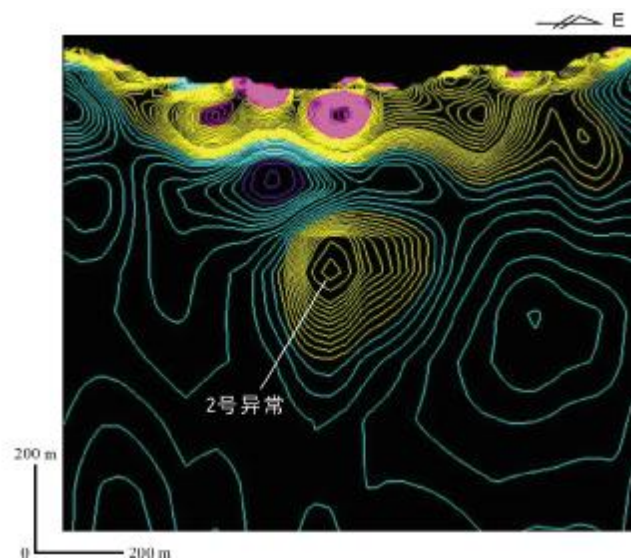


图3 AMT测量2号异常图

Fig. 3 No. 2 anomaly map by AMT survey

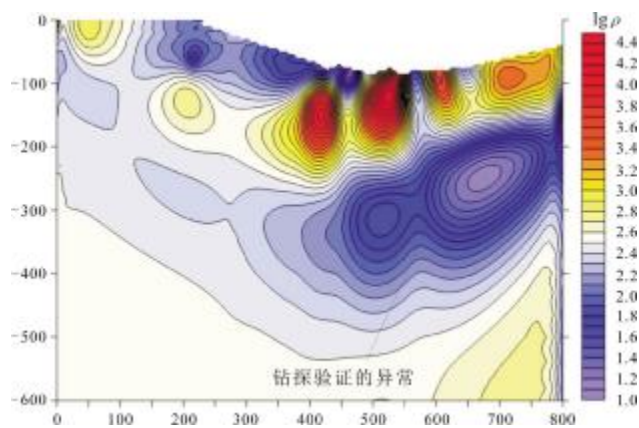


图4 AMT测量NL3剖面二维反演结果图

Fig. 4 Two-dimensional inversion result of NL3 section by AMT survey

6 问题讨论与结论

瓦房店金刚石矿母岩——金伯利岩呈脉状或岩管状产出,由于岩体规模较小、围岩性质各异,在勘查的

过程中物探方法和效果也有所不同。地面磁测是一个重要而有效的方法,在众多金伯利岩体的发现过程中起到了不可替代的作用,也是查证水系重砂异常时的首选物探方法。但本区的金伯利岩磁性极不均匀,30 号和 42 号岩管在不同的航磁测量结果中均有较明显的异常,而 50 号岩管则不同,航测飞行高度 55 m 时有较明显异常,而飞行高度 86 m 时异常已经不明显^[9],50 号岩管的地磁异常边界也仅有 50 nT。除金伯利岩本身磁性不均匀、磁性较弱外,瓦房店金刚石矿田还分布有一些具有磁性的辉绿岩、橄榄玄武岩等岩体对磁测方法的应用带来一定的干扰。本区已查证过几百个大大小小的航磁异常,目前还没有通过查证航磁而发现新的金伯利岩体。

电法是瓦房店金刚石矿田勘查中应用较少的工作方法,虽然以往也曾做过一些电法剖面测量,但都是试验性质的工作,没有广泛应用于勘查工作。2019 年在瓦房店幅开展了区域性的综合剖面测量,电法工作中的 MT 测量虽然不是直接用于寻找金伯利岩体,但利用其探测深度大的优势在研究本区新元古代盆地形态等基础地质问题时具有得天独厚的优势。2014 年以来,在 30 号、50 号岩管矿区相继做了一些 AMT 测量工作,尝试利用电法获取深部金伯利岩体形态信息,结果表明在一定的条件下是可以实现的,50-1 号金伯利岩体就是根据微弱的 AMT 异常而发现的。

除电法、磁法外,重力在研究本区推覆构造等特定问题时作用非常明显,通过重力测量和剖面反演,了解了标志层的深部形态特征,为后续勘查工作部署提供了依据。研究区井中物探工作主要开展了井中三分量磁测、三侧向电阻率测量以及地井或井地方式激电测量等,在发现 50-1 号岩体的过程中起了很重要的作用。从目前的结果看,井中物探在金刚石矿勘查中只有在特定的条件下才会真正发挥作用。

总体来说,物探工作在瓦房店矿田金刚石矿勘查中具有举足轻重的作用,有些方法可以用于直接发现金伯利岩体,有些方法可以用于解决相关地质问题,重点区域的微弱物探异常有时也具有找矿意义。各方法的有机融合,与其他地质方法的密切配合,构成了瓦房店金刚石矿田矿勘查中的物探工作体系。

致谢:感谢辽宁省地质勘探矿业集团付海涛在工

作中给予的无私帮助,感谢辽宁省找矿突破战略行动技术指导专家组的悉心指导,感谢项目组全体成员和辽宁金刚石勘查技术攻关团队各位专家付出的辛勤劳动和大力支持!

参考文献(References):

- [1]郑建平,路凤香,叶德隆.辽东半岛南部金伯利岩成因讨论[J].辽宁地质,1989(4): 321-333.
Zheng J P, Lu F X, Ye D L. The genesis of kimberlite from S. Liaodong peninsula[J]. Liaoning Geology, 1989(4): 321-333.
- [2]张宏福,杨岳衡.华北克拉通东部含金刚石金伯利岩的侵位年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学特征[J].岩石学报,2007,23(2): 285-294.
Zhang H F, Yang Y H. Emplacement age and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics of the diamondiferous kimberlites from the eastern North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2): 285-294.
- [3]齐玉兴,施中爽,韩柱国.辽宁金刚石矿找矿与勘查[J].辽宁地质,1998(2): 111-125.
Qi Y X, Shi Z S, Han Z G. The prospecting and exploration of diamond deposits in Liaoning[J]. Liaoning Geology, 1998(2): 111-125.
- [4]付海涛.辽宁瓦房店金刚石矿田金伯利岩侵位机制分析[J].地质学报,2020,94(9): 2640-2649.
Fu H T. Analysis of kimberlite emplacement mechanism in the Wafangdian diamond ore field[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(9): 2640-2649.
- [5]张国仁,仲米山,潘玉啟,等.辽宁瓦房店金刚石成矿带发现逆冲推覆构造[J].地质与资源,2020,29(3): 294-298.
Zhang G R, Zhong M S, Pan Y Q, et al. Thrust nappe structure discovered in Wafangdian diamond metallogenic belt of Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2020, 29(3): 294-298.
- [6]刘世义,孙吉生.辽南金伯利岩的磁异常特征[J].地质科技情报,1993,12(S1): 14-20.
Liu S Y, Sun J S. Magnetic anomalies of kimberlite in southern Liaoning[J]. Geological Science and Technology Information, 1993, 12(S1): 14-20.
- [7]孟小红,谭承泽.辽宁复县金伯利岩的磁性特征及其意义[J].地球物理学报,1994,37(3): 353-361.
Meng X H, Tan C Z. The characteristic and significance of Liaonan kimberlites, Liaoning Province[J]. Acta Geophysica Sinica, 1994, 37(3): 353-361.
- [8]周树海.GSM-18 型高精度磁力仪在寻找隐伏金伯利岩管中的应用及效果[J].辽宁地质,1997(3): 71-78.
Zhou S H. GSM 18 precision magnetometer used in searching for buried kimberlite pipe[J]. Liaoning Geology, 1997(3): 71-78.
- [9]安战锋,贾志业,王萌,等.辽宁瓦房店地区金刚石航磁调查飞行方法探讨[J].物探与化探,2017,41(1): 111-115.

- An Z F, Jia Z Y, Wang M, et al. A tentative discussion on the aeromagnetic flight method for the diamond survey in Wafangdian, Liaoning Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(1): 111-115.
- [10] 万方来, 蒋金晶. 音频大地电磁测深法在辽宁瓦房店金伯利岩矿区的应用[J]. *华东地质*, 2018, 39(1): 42-49.
- Wang F L, Jiang J J. AMT application in kimberlite ore district in the Wafangdian area, Liaoning Province[J]. *East China Geology*, 2018, 39(1): 42-49.
- [11] 赵春强, 张志斌, 时溢, 等. 辽南金刚石成矿背景研究进展及讨论[J]. *地质与资源*, 2018, 27(2): 149-159.
- Zhao C Q, Zhang Z B, Shi Y, et al. Research progress and discussion on the metallogenic background of diamond in Southern Liaoning [J]. *Geology and Resources*, 2018, 27(2): 149-159.
- [12] 王俊茹. 磁法寻找金伯利岩效果的讨论[J]. *物探与化探*, 1984, 8(3): 134-141.
- Wang J R. A discussion magnetic prospecting for kimberlites [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1984, 8(3): 134-141.
- [13] 颜彬. 金伯利岩地球物理异常特征及地球物理勘查模式[J]. *江苏地质*, 1991(2): 72-76.
- Yan B. Geophysical characters of kimberlite and diamond geophysical exploration model[J]. *Journal of Geology*, 1991(2): 72-76.
- [14] 潘玉玲, 魏文博, 李振宇. 利用电法勘探实现金伯利岩立体勘查模式初探[J]. *地质科技情报*, 1993, 12(S1): 67-71.
- Pan Y L, Wei W B, Li Z Y. A preliminary discussion on the realization of space exploration model of kimberlite with electrical exploration [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1993, 12(S1): 67-71.
- [15] 王兴昌. 金伯利岩物化探找矿模式及其远景区预测[J]. *山东地质*, 1996, 12(1): 35-49.
- Wang X C. Geophysical and geochemical prospecting model of kimberlite and predication of prospective areas[J]. *Geology of Shandong*, 1996, 12(1): 35-49.
- [16] 王聿军, 仲卫国, 张善法. 金伯利岩的物化探异常特征及勘探方法[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(1): 108-111.
- Wang Y J, Zhong W G, Zhang S F. The geophysical and geochemical abnormal features and prospection methods of kimberlite[J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(1): 108-111.
- [17] 刘效才, 宋世杰, 严根苗, 等. 鲁西地区金伯利岩的磁异常特征及物探方法有效性浅析[J]. *山东国土资源*, 2017, 33(8): 63-68.
- Liu X C, Song S J, Yan G M, et al. Primary analysis on magnetic anomaly characteristics of kimberlite and availability of geophysical prospecting in western Shandong Province [J]. *Shandong Land and Resources*, 2017, 33(8): 63-68.
- [18] 褚志远, 王树星, 付帅. 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*, 2018, 34(6): 59-64.
- Chu Z Y, Wang S X, Fu S. Application of controlled source audio magnetotelluric method in prospecting diamond primary ores in Xiyu mining area[J]. *Shandong Land and Resources*, 2018, 34(6): 59-64.
- [19] 付海涛, 单学东, 康宁, 等. 三维建模技术在30号岩管勘查中的应用[J]. *地球科学前沿*, 2017, 7(5): 645-652.
- Fu H T, Shan X D, Kang N, et al. The application of 3D modeling technology in the No.30 kimberlite rock pipe exploration[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2017, 7(5): 645-652.
- [20] 付海涛. 三维建模技术在金刚石勘查中的应用——以辽宁省瓦房店地区为例[J]. *地质通报*, 2019, 38(1): 51-55.
- Fu H T. The application of 3D modeling technology to the kimberlite rock tube exploration: A case study of Wafangdian in Liaoning Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(1): 51-55.

(上接第38页/Continued from Page 38)

- [23] 刘博奥. 准中地区侏罗系烃源岩地球化学特征[J]. *科学技术创新*, 2020(3): 39-40.
- Liu B A. Geochemical characteristics of Jurassic hydrocarbon source rocks in central Junggar Basin [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2020(3): 39-40. (in Chinese)
- [24] 袁二军, 崔彬, 冯小伟, 等. 南祁连盆地东北部木里地区三叠系杂勒得寺组烃源岩评价[J]. *中国矿业*, 2013, 22(S1): 163-167.
- Yuan E J, Cui B, Feng X W, et al. Triassic Galede Temple Group hydrocarbon source rock evaluation in Muli area northeast of the Southern Qilian Basin [J]. *China Mining Magazine*, 2013, 22(S1): 163-167.
- [25] 龚德瑜, 王绪龙, 周川闽, 等. 准噶尔盆地西北缘中三叠统克拉玛依组烃源岩生烃潜力[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(2): 328-340.
- Gong D Y, Wang X L, Zhou C M, et al. Hydrocarbon generation potential of Middle Triassic Karamay Formation in the northwestern Junggar Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(2): 328-340.