

辽宁瓦房店金刚石矿田金伯利岩地质特征

付海涛¹⁾, 万方来²⁾, 蒋丽丽³⁾, 徐 华²⁾, 李伟昕³⁾, 杨 磊²⁾

1)辽宁省地质勘探矿业集团, 辽宁沈阳 110032; 2)辽宁省第六地质大队有限责任公司, 辽宁大连 116200;
3)辽宁省物测勘查院有限责任公司, 辽宁沈阳 110121

摘 要: 辽宁瓦房店金刚石矿田位于华北陆块辽东新元古代—古生代拗陷带。矿田内金刚石矿均为金伯利岩型, 目前已发现 100 多个金伯利岩体, 提交了 4 个大型原生金刚石矿床和 3 个近源小型金刚石砂矿床, 资源量占全国的一半以上。矿田内金伯利岩体成群、成带分布, 有岩管也有岩脉, 大小不等、形态各异。由于金伯利岩既是金刚石矿的载体, 也是研究地球深部信息的重要对象, 在金刚石矿勘查过程中对岩体地质特征进行了研究。本文认为, 矿田内不同区域金伯利岩体受围岩成分混染的程度不同, 西南部的岩群区金伯利岩体更适合用于研究深部信息; 本区影响岩体形态的主要因素是断裂构造, 其提供了岩浆上侵通道和就位空间, 成岩后的逆冲推覆构造改造了岩体的形态。同时认为, 区内控制金伯利岩浆上侵的深大断裂为古邻庐断裂。

关键词: 金伯利岩; 地质特征; 混染指数; 逆冲推覆构造; 辽宁瓦房店

中图分类号: P619.241 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2021.092602

Geological Characteristics of Kimberlites in Wafangdian Diamond Orefield, Liaoning Province

FU Hai-tao¹⁾, WAN Fang-lai²⁾, JIANG Li-li³⁾, XU Hua²⁾, LI Yi-xin³⁾, YANG Lei²⁾

1) Liaoning Geological Exploration and Mining Group, Shenyang, Liaoning 110032;

2) Liaoning Sixth Geological Brigade Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116200;

3) Geophysical Measuring Exploration Institute of Liaoning Province, Shenyang, Liaoning 110121

Abstract: The Wafangdian diamond ore field in Liaoning is located in the Neoproterozoic-Paleozoic depression zone of Liaodong in the North China Block. The diamond mines in the ore field are all kimberlitic-type. To date, more than 100 kimberlites have been discovered, among which there are four large primary diamond deposits and three near-source small diamond sand deposits. The deposits account for more than half of China's diamond resources. The kimberlites in the ore field are distributed in swarms and belts, with rock pipes and rock veins that vary in size and shape. Kimberlite is not only the carrier of diamonds, but also important for studying the deep Earth. In this study, the characteristics of kimberlitic intrusions were studied during the exploration of diamond mines. It is believed that the kimberlites in different areas of the ore field were contaminated by the surrounding rock composition to different degrees. The kimberlites in the southwestern swarms are more suitable for studying the deep earth. The main factors affecting the shape of the pipes or veins in this area is the fault structure, which provided in-situ magma intrusion channels, and the thrust nappe structure after diagenesis. It is also believed that the large and deep fault that controls the kimberlitic intrusion in the area is the old Tanlu fault.

Key words: kimberlite; geological characteristics; contamination index; thrust nappe structure; Wafangdian, Liaoning

辽宁省是我国重要的金伯利岩分布区, 辽南的瓦房店地区、辽东的桓仁地区、辽北的铁岭地区和辽西的葫芦岛地区都有金伯利岩出露(图 1a)。其中, 辽南的瓦房店地区最为典型, 从 1971 年在该区发

本文由 2019 年度辽宁省地质勘查项目“瓦房店金刚石整装勘查区增储专项”(编号: LN2019-0078-20)资助。

收稿日期: 2021-06-23; 改回日期: 2021-09-20; 网络首发日期: 2021-09-27。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 付海涛, 男, 1959 年生。博士, 教授级高级工程师。长期从事成矿预测研究, 近年来重点研究瓦房店地区金刚石成矿规律和控矿因素问题。E-mail: lnfht@163.com。

现第一个金伯利岩体以来,已发现超过 100 个金伯利岩体,既有岩管也有岩脉,该区已提交 4 个大型原生金伯利岩型金刚石矿床和 3 个近源小型金刚石砂矿床。金伯利岩既是金刚石矿的载体,也是研究地球深部信息的重要对象,其作为地球上来源最深的岩浆岩含有大量的深部物质信息,因而具有重要的科学价值(路凤香和桑隆, 2002)。长期以来,专家学者对瓦房店地区的金伯利岩做了大量研究工作,认为该区金伯利岩体的岩浆来源深度约为 215 km,以 18 m/s 的上升速度沿着一定宽度的裂隙快速上侵而形成目前看到的金伯利岩(郑建平等, 1989),侵位时间约为 465 Ma(张宏福和杨岳衡, 2007),金伯利岩受断裂构造控制,岩管产出于构造交汇部位(齐玉兴等, 1998),金伯利岩的分布与构造盆地有关(付海涛, 2020)。最新研究结果表明,瓦房店地区存在逆冲推覆构造,可能对金伯利岩体的形态造成了破坏(张国仁等, 2020)。

在金刚石矿勘查过程中对金伯利岩体地质特征进行了研究,认为有必要对区内金伯利岩分布规律重新认识,将原来的 4 个矿带划分为 3 个不同产出特征的区域可能更为合理(图 1)。同时认为,逆冲推覆构造是影响区内金伯利岩体形态特征的重要因素。

1 瓦房店金刚石矿田金伯利岩分布规律

瓦房店金刚石矿田位于辽宁省南部,行政区隶属于大连市。大地构造位置位于华北陆块辽东新元古代—古生代拗陷带,跨两个四级构造单元,东侧为城子坦—庄河太古宙基底隆起,西侧为大连新元古代—古生代凹陷,总面积约 4000 km²。东侧隆起区主要出露新太古界片麻岩;西侧凹陷区,出露有古元古界、新元古界、古生界、中生界,以及沟谷中的新生界。其中,新元古界分布面积最大,约占全区总面积的 60%。

瓦房店矿田的金伯利岩可简化分为三类五种岩性,即块状金伯利岩、含岩球金伯利岩和角砾状金伯利岩。其中块状金伯利岩分为两种岩性,一是斑状金伯利岩,呈暗绿色,圆斑状结构、块状构造,圆斑晶为蛇纹石化、滑石化、碳酸盐化橄榄石(假像)和椭圆饼状金云母。斑晶含量一般 15%~20%,基质为橄榄石(假像)、铬铁矿、锐钛矿及隐晶或微晶质方解石等组成;二是斑状金云母金伯利岩,呈灰绿色,地表风化后呈灰-黄褐色,斑状结构、块状构造。金云母含量大于 15%。斑晶为蛇纹石化、碳酸盐化橄榄石(假像),一般直径 3~5 mm,最大可达 10 mm 以上,含量一般小于 30%。金云母呈淡黄色,风化后呈银白色薄片状,片径 3~5 mm。含岩球斑状金伯利岩,岩石呈灰绿-黑绿色,风化后表面呈黄

绿色、黄褐色,具有特殊的球状构造。风化强烈的岩石岩球脱落,在其残坡积物中可见大小不等的圆形球蛋。此种金伯利岩在 1 号、30 号和 42 号等岩管均有见到。其中 42 号岩管,岩球含量平均达 25.6%,球径一般为 10~30 mm,最大为 150 mm,岩球由核心及外壳组成,核心一般为浑圆状橄榄石(假像),少数核心为蚀变片麻岩,外壳由细粒斑状金伯利岩组成。这类金伯利岩除岩球外,其它则是斑状金云母金伯利岩或斑状金伯利岩。角砾状金伯利岩也分为两种岩性,一是含围岩角砾金伯利岩,呈灰绿、暗绿色,发育强碳酸盐化时呈灰白色,地表风化后呈黄褐色。碎屑结构、角砾状构造。角砾为围岩角砾和早期的金伯利凝灰角砾岩,角砾大小由几 mm,到几百 mm 不等,围岩角砾边部常见有滑石化和绿泥石化,胶结物为斑状(金云母)金伯利岩;二是含金伯利岩物质角砾岩,该岩性中角砾为不规则棱角状围岩角砾,角砾含量 95%以上,角砾大小不一,大的可达 2 m,胶结物主要由小于 2 mm 的各种围岩细碎屑及金伯利岩组成。

岩管以角砾状金伯利岩为主,其中最著名的 50 号岩管角砾状金伯利岩约占 80%,块状金伯利岩约占 20%。而脉状金伯利岩则基本上都是块状金伯利岩。区内金伯利岩的蚀变作用主要为蛇纹石化和碳酸盐化,地表褐铁矿化、绿泥石化比较发育,深部逐渐变弱。强烈碳酸盐化是矿区金伯利岩显著的、普遍的蚀变作用。

1.1 金伯利岩体平面分布特征

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 113 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。这些金伯利岩体成群成带分布,局部地段岩体成带性非常明显,在小比例尺图面上可以清晰看到金伯利岩体呈线状或孤状展布(图 1b)。以往在矿田核心区将金伯利岩划分为 3 个矿带,将西北侧出露有可疑岩体的地段划分为第Ⅳ矿带。本次研究,根据金伯利岩体相邻关系将金伯利岩划分为 1 个岩群区、1 个岩带区和 1 个单岩体区(图 1)。

①岩群区金伯利岩成群分布,仅有少量单独的金伯利岩体,位于原Ⅰ、Ⅱ矿带的西南端,分布有 37 个金伯利岩体,其中 10 个是岩管,岩群区有 5 个岩群和 3 个单独的金伯利岩体,1、2 号岩管以及 50 号和 51-68-74 号岩管两个大型原生金刚石矿床分布在此区。

②岩带区金伯利岩成带分布,范围包括原Ⅰ矿带中部、Ⅱ矿带区东部和Ⅲ矿带,区内有 58 个

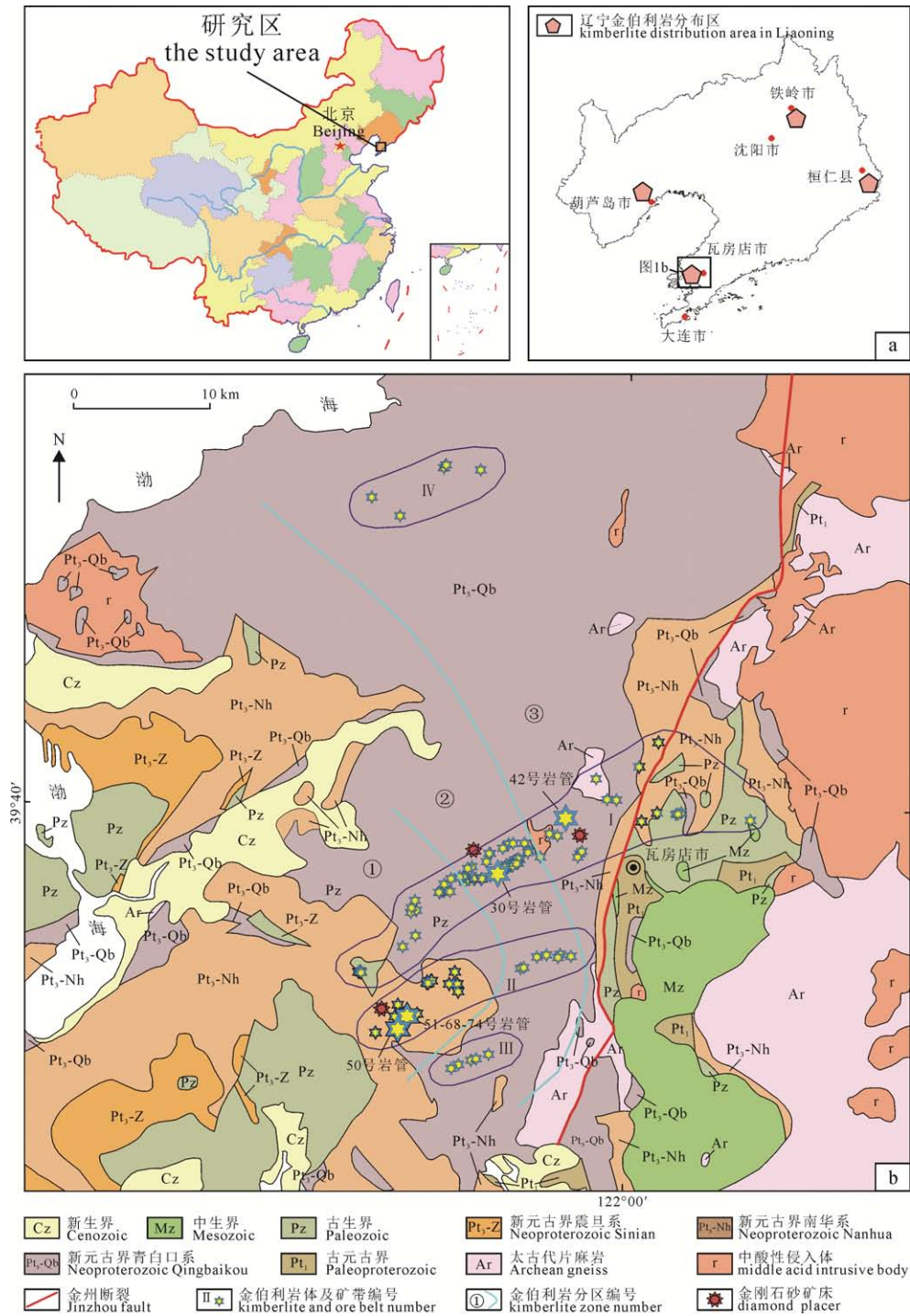


图 1 辽宁金伯利岩区域分布(a)和瓦房店金刚石矿田地质简图(b)(根据辽宁省地质勘查院, 2017 改编)
Fig. 1 Regional distribution of kimberlites in Liaoning (a) and a simplified geological map of the Wafangdian diamond ore field (b) (adapted from Liaoning Provincial Institute of Geological Exploration, 2017)

金伯利岩体, 其中 8 个是岩管, 包括 30 号岩管大型原生金刚石矿床和 34、38、110、111 号等岩管, 岩带区内各岩体之间相距很近, 平面上构成直线状或孤线状 4 条岩带。

③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, 这一区域包括原 I 矿带东端和 IV 矿带, 区内有 18 个金伯利岩体和 7 个疑似金伯利岩体, 其中 6 个是岩管, 42 号大型原生金刚石矿床出露在此区域内。

1.2 金伯利岩体地表形态特征

本区金伯利岩体受断裂构造控制特征明显, 按产出形态分为岩脉和岩管, 岩脉形态简单, 产状比较稳定, 岩管形态较为复杂。

岩脉一般呈北东东至近东西向展布, 走向 $65^{\circ} \sim 90^{\circ}$, 方向性明显, 严格受密集节理带控制, 相邻脉体相互平行, 走向一般比较稳定, 倾向南东, 倾角 $70^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 之间, 长度几十米到千余米不等, 脉宽 $0.2 \sim 1.0$ m, 个别地段可达 $3 \sim 5$ m。一般来说, 脉

体形态简单规整,与围岩界线清楚,脉幅变化较小,仅在局部有膨大或变窄现象,单个脉沿走向具有尖灭再现分枝复合现象,局部可见几条相互平行的脉组成一个小脉带。脉状金伯利岩岩性比较简单主要为强碳酸盐化斑状金云母金伯利岩,一般均含有金刚石。

岩管的形态比较复杂,地表出露形态有椭圆状、棱形状、葫芦状和不规则状等(图2)有的岩管具有明显的长轴方向,有的岩管则呈近等轴状,能看出长轴方向的基本上其长轴方向均为近东西向或北东向,规模较大的以近东西向为主,如30号、50号岩管。地表出露面积最大的是42号岩管,面积约41 200 m²,小岩管的面积甚至小于100 m²。岩管多数向南倾斜,倾角75°~85°。

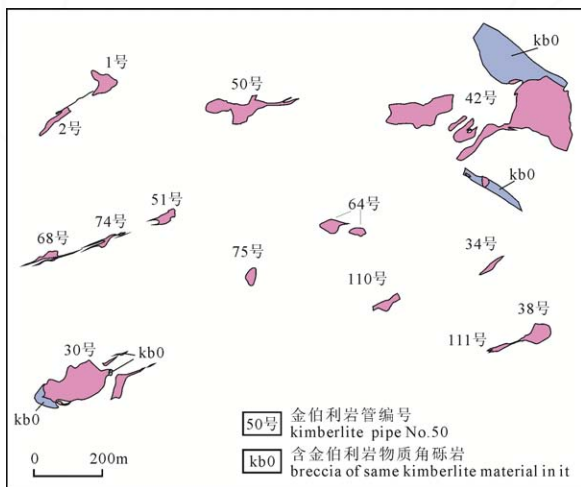


图2 典型金伯利岩管形态示意图
Fig. 2 Schematic diagram of typical kimberlite pipe morphology

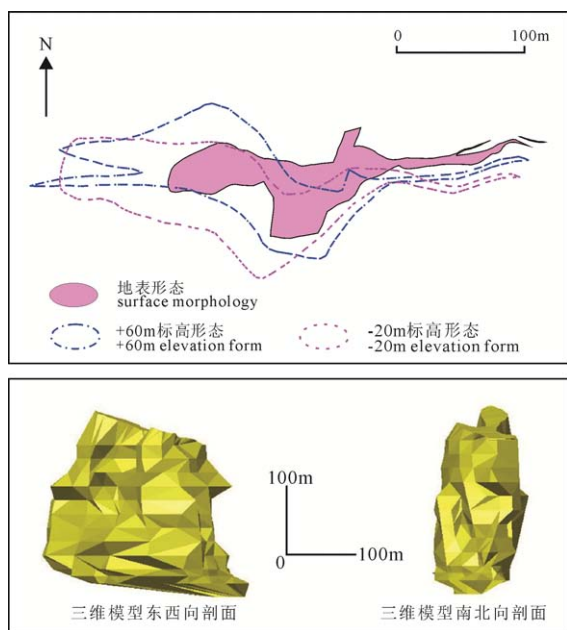


图3 50号岩管空间形态示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the spatial morphology of No. 50 kimberlite pipe

1.3 典型金伯利岩体深部形态特征

自从发现金伯利岩以来,本区的金刚石勘查工作基本上没有中断,对4个大型原生矿床施工了大量的钻探工作量,对岩体形态的控制也比较好。

50号岩管是区内最著名的岩管,位于岩群区,已开发利用。据勘探报告记载,该岩管出露标高130~200 m,主矿体部分地表呈不规则菱形,东西较长、南北较窄,长宽比为4.8:1,东部为脉状。岩管纵向变化较大,在+60~-20 m标高部位膨大,地表与+60 m标高岩管面积的比值为1:1.9,地表与-20 m标高岩管面积的比值为1:2.3,岩管倾向南南西,倾角70°~78°。在-70 m标高左右急剧收缩尖灭。图3示意了50号岩管不同标高的形态。根据矿区钻孔资料建立的三维矿体模型显示,50号岩管

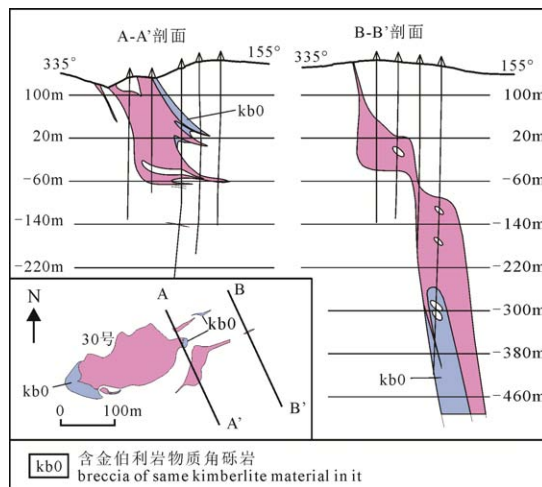


图4 30号岩管深部形态示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the deep morphology of No. 30 kimberlite pipe

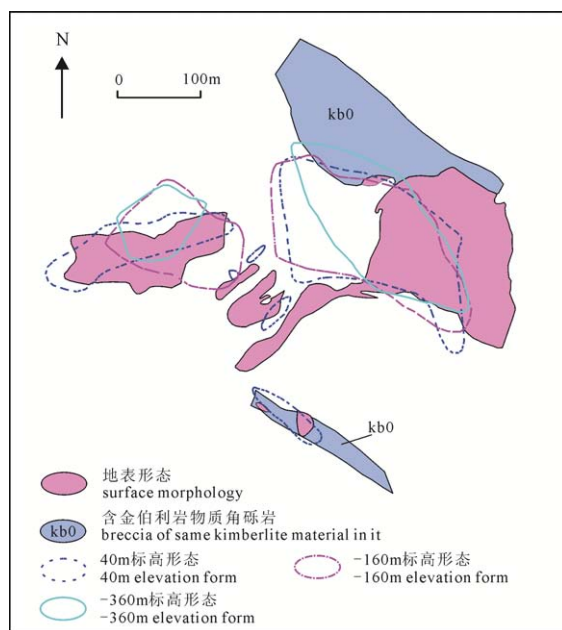


图5 42号岩管不同标高水平投影断面示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the morphology of No. 42 kimberlite pipe at different elevation levels

主矿体部分呈靴子状, 底部西端翘起似鞋跟、东端有拖尾似鞋尖, 底界平直, 总体上为一个厚大板状体, 向南倾斜, 倾角约 85° 。

30 号岩管是目前区内工程控制最深的岩管, 位于岩带区。地表形态为长椭圆形, 长轴方向 70° , 长 212 m, 平均宽 80 m。详查报告认为, 岩管分为 30-1 和 30-2 两个矿体。30-1 出露于地表, 倾向南东, 倾角 50° 左右, 延深 120 m, 在其南东侧存在隐伏矿体, 编号为 30-2。图 4 两条勘探线剖面示意了 30 号岩管的深部形态。根据矿区钻孔资料, 认为 30 号岩管是近直立的金伯利岩管, 在被近水平断层错断后, 钻孔揭露到的矿体向南东方向逐渐加深从而显示侧伏的特征(付海涛等, 2017)。总体来看, 30 号岩管还是一个相对完整的岩管, 只是局部有些错动。30 号岩管是区内面积第二大的岩管, 边部出露有含金伯利岩物质的角砾岩, 钻孔中在岩管南侧见有该类型角砾岩, 但与地表见到的角砾岩不具有上下对应关系。

42 号岩管位于单岩体区, 地表南北两侧出露有含金伯利岩物质角砾岩, 中间为金伯利岩管(图 5), 呈筒状, 不同标高形态变化不大, 是区内唯一一个上下近等粗的筒状岩管, 也是目前我国面积最大的金伯利岩体。地表出露标高约 150 m, 钻探控制岩体延深超过 560 m, 由于是区内 4 个大型原生金刚石矿床中品位最低的, 所以工作程度相对较低, 有部分钻孔终孔在岩体之中, 也就是说这个岩管向下还有延深。

相对来说, 本区金伯利岩管的工程控制程度要好于岩脉, 尤其是 4 个大型原生金刚石矿床的控制程度更高。位于 50 号岩管北侧 1 km 处由 51 号、68 号和 74 号三个岩管组成的大型原生金刚石矿床, 虽然地表出露面积相差不大, 但钻孔控制的范围内, 51 号岩管明显比另外两个岩管大很多, 至少向下延深了近 400 m, 不同标高处岩管的水平断面面积略大于地表出露面积; 74 号岩管是向下延深较小的一个, 仅在少数几个钻孔中见到; 68 号岩管不同标高水平断面的面积变化也不大。根据钻孔资料, 西端的 68 号岩管在 -200 m 左右、东端的 51 号在 -240 m 标高处岩管突然中断, 这两点的连线角度与 50 号岩管底部界面的连线角度基本相同。

本区金伯利岩脉一般控制程度较低, 钻孔中见到的脉体与地表见到的脉体不论是厚度还是岩性变化都不大, 但未发现向下延深较大的脉体。

2 瓦房店矿田金伯利岩地球化学特征

前人研究成果认为, 辽宁金伯利岩的化学组成与世界金伯利岩平均成分相比, 碱度偏低; 与南非、前苏联和我国山东金伯利岩成分相比, Fe 质偏

高; 与上地幔岩石相比, 铁族元素降低, 稀有及稀土元素、放射性元素、钨钼族元素、亲铜元素等相对富集(李星云等, 1989)。

有学者认为, 用混染指数 $C.I = \frac{(SiO_2 + Al_2O_3 + Na_2O)}{(MgO + 2K_2O)}$, 可以较好地反映金伯利岩中壳源岩石的混染程度, 受混染的金伯利岩 $C.I > 1.5$, 我国部分金伯利岩受到了混染作用的影响(董振信, 1991)。本次研究对不同分区典型岩管的样品分析结果进行统计, 结果显示, 本区金伯利岩的混染指数具有一定的规律性, 岩群区的 1 号、50 号和 51 号岩管的 $C.I < 1.5$, 岩带区和单岩体区的金伯利岩的 $C.I \geq 1.5$ (见表 1)。说明瓦房店矿田岩群区的金伯利岩受混染的影响可能较小, 更适合于开展深部物质信息的研究。同时, 对典型金伯利岩体与世界金伯利岩成分进行了对比(见表 2), 结果显示, 瓦房店矿田的金伯利岩总体上富 Ca、Al, 特别是位于岩带区的岩体 Ca 含量更高, 甚至高出世界平均值的 3~4 倍; 贫 Mg、Na, 岩带区的岩体甚至只有世界平均值的 30% 左右; 本次研究的岩体中除 51 号岩管外, 其它岩体呈现贫 K 特征; 位于单岩体区的 42 号岩管, 贫 Mg、K、Na、P, 富 Si、Al、Ca、Ti、Fe, 是区内唯一一个富 Si、Fe 的岩体。

3 瓦房店矿田金伯利岩地球物理特征

瓦房店矿田金伯利岩最重要的地球物理特征是其具有明显而不均匀的磁性, 表 3 记录了矿田典型金伯利岩的磁化率和剩余磁化强度。从表 3 上可以看到, 各岩体的磁性变化较大, 有的岩体磁化率变化可达百倍以上, 有的岩体磁化率则变化较小。50 号岩管的剩磁明显高于其它岩体。碳酸盐化金伯利岩(如 11 号脉)的磁性明显降低, 甚至达到无磁性状态。

根据航磁和地磁测量结果, 金伯利岩体具有磁异常。面积较大的 30 号和 42 号岩管, 1:5 万航磁测量有明显的异常显示, 异常强度超过 100 nT, 而面积相对较小的 50 号岩管只有在降低测线高度至几十米时才能观测到很弱的异常(安战锋等, 2017)。地磁测量是本区发现金伯利岩的重要手段, 1:2000 地磁 ΔZ 测量结果, 50 号岩管, 50 nT 等值线大致是岩管的出露边界; 30 号岩管, 100 nT 等值线揭示了隐伏矿体的范围。42 号岩管, 1:5000 地磁 ΔZ 测量结果 200 nT 等值线大致是岩管的出露边界。51 号岩管是通过 1:2000 地磁测量而发现的, 而 68 号和 74 号岩管在 1:2000 地磁测量结果中却没有异常。不同的岩体磁测比例尺不同, 有些小岩管需要用 1:1000 地磁测量才能用磁异常圈出岩体的范围。

总体上看,本内地层基本上属无磁性地质体,金伯利岩属中等磁性地质体,与区内辉绿岩、橄榄玄武岩等磁性相当。

表 4 是 30 号和 50 号两个岩管的电阻率统计结果。总体上,金伯利岩属中低电阻率地质体,50 号

岩管电阻率略高于 30 号岩管。当围岩是高阻的泥灰岩、片麻岩时,金伯利岩显示为低阻体;当围岩是粉砂岩、页岩时,金伯利岩与围岩之间几乎无电阻率差异,很难在这些岩性中判断出金伯利岩的位置。

表 1 瓦房店矿田典型金伯利岩体混染指数统计表
Table 1 Statistical table of contamination index of typical kimberlites in Wafangdian ore field

岩体编号	样品数量	所属分区	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	混染指数
50 号岩管	26	岩群区	26.22	0.55	0.28	33.85	3.01	1.36
51 号岩管	23	岩群区	27.38	1.29	0.20	34.09	3.41	1.26
1 号岩管	7	岩群区	23.79	0.46	0.14	27.91	4.42	1.31
30 号岩管	20	岩带区	20.86	0.48	0.17	29.38	3.19	1.50
38 号岩管	3	岩带区	10.59	0.28	0.09	19.75	3.33	2.08
110 号岩管	3	岩带区	13.45	0.56	0.11	22.20	3.48	1.77
111 号岩管	2	岩带区	9.05	0.38	0.09	27.74	3.35	3.18
42 号岩管	18	单岩体区	25.33	0.88	0.13	38.37	4.99	1.61

注:混染指数 $C.I=(SiO_2+Al_2O_3+Na_2O)/(MgO+2K_2O)$ 。

表 2 瓦房店矿田典型金伯利岩体元素含量与世界平均值的比值
Table 2 Ratio of element content of typical kimberlites in Wafangdian ore field compared to the world average

序号	岩体编号	样品数量	所属分区	Mg	K	Na	Si	Al	P	Ca	Ti	Fe
1	50 号岩管	26	岩群区	0.835	0.467	0.850	0.975	1.047	0.640	1.454	1.300	0.922
2	51 号岩管	23	岩群区	0.872	1.106	0.611	0.982	1.184	0.568	1.073	0.812	0.957
3	1 号岩管	7	岩群区	0.757	0.393	0.415	0.804	1.536	1.004	2.247	1.005	0.920
4	30 号岩管	20	岩带区	0.664	0.411	0.504	0.846	1.109	0.521	2.612	1.032	0.897
5	111 岩管	2	岩带区	0.288	0.321	0.273	0.799	1.163	0.674	3.438	0.945	0.892
6	110 岩管	3	岩带区	0.428	0.479	0.343	0.639	1.207	1.037	3.515	0.871	0.898
7	38 岩管	3	岩带区	0.337	0.239	0.262	0.569	1.158	0.653	4.513	0.879	0.589
8	42 号岩管	18	单岩体区	0.806	0.751	0.389	1.105	1.732	0.669	1.062	1.500	1.049
9	金伯利岩平均成分			18.944	0.971	0.245	16.234	1.524	0.463	4.138	0.755	6.675

注:表中 1—8 项是各岩管相关元素与世界金伯利岩平均成分的比值,第 9 项是根据李星云等(1989)资料的世界金伯利岩平均成分。

表 3 瓦房店矿田典型金伯利岩磁性参数统计表
Table 3 Statistical table of magnetic parameters of typical kimberlites in Wafangdian ore field

序号	岩石名称	采样地点	块数	磁化率/($\times 10^{-6}$ 4 π SI)			剩余磁化强度/($\times 10^{-6}$ 4 π SI)		
				最小	最大	平均值	最小	最大	平均值
1	斑状金伯利岩	1、2 号岩管	46	30	12 720	1 750	20	9 670	720
2	斑状金伯利岩	30 号岩管	4	3260	5 440	4 620	229	7 422	527
3	斑状金伯利岩	42 号岩管	45	57	12 064	2 201	28	5 702	572
4	金云母金伯利岩	50 号岩管	5	4830	5 980	323	606	7 540	2 937
5	碳酸盐化金伯利岩	3 号脉	11	0	1 740	150	0	645	50
6	碳酸盐化金伯利岩	11 号脉	20	0	71	3	0	645	3
7	斑状金云母金伯利岩	50 号坑道	27	1730	19 220	7 954	2 135	9 214	3 930
8	斑状金云母金伯利岩	30 号岩心	8	657	1 940	1 418	122	760	284
9	角砾状金伯利岩	30 号露头	3	112	142	116	0	75	39
10	碳酸盐化斑状金伯利岩	30 号岩心	22	0	1 471	138	0	192	24
11	碳酸盐化斑状金云母金伯利岩	50 号坑道	15	0	160	11	0	54	4
12	碳酸盐化金云母金伯利岩	50 号坑道	26	0	3 409	1 878	35	2 544	1 345

注:1—6 根据辽宁省地质局第六地质大队(1980)资料,7—12 根据刘世义等(1993)资料。

表 4 瓦房店矿田 30 号、50 号金伯利岩管电阻率统计表
Table 4 Resistivity of No. 30 and No. 50 kimberlite pipes in Wafangdian ore field

标本岩性	采集地点	块数	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot m)$ 变化范围	均值/ $(\Omega \cdot m)$
斑状金云母金伯利岩	30 号岩管	10	60 ~ 70	66
含围岩角砾金伯利岩	30 号岩管	10	50 ~ 100	71
含岩球的斑状金伯利岩	30 号岩管	10	80 ~ 100	93
碳酸盐化金伯利岩	30 号岩管	6	100 ~ 150	117
金伯利岩	30 号岩管	10	50 ~ 500	213
含金伯利岩物质角砾岩	30 号岩管	10	300 ~ 500	396
金伯利岩	50 号岩管	30	212 ~ 1278	606

4 问题与讨论

4.1 影响本区金伯利岩形态的主要因素

巨(大)型构造是控制金伯利岩产区的重要因素(李开善, 1981); 金伯利岩浆沿裂隙快速上侵(郑建平等, 1989); 就位于寒武系毛庄组以下层位的地层之中, 矿田见有金伯利岩被同位素年龄为 95 ~ 144 Ma 的橄榄玄武岩所穿切(赵春强等, 2018); 测年结果显示, 30 号岩管 432 Ma, 42 号岩管 341 Ma、356 Ma、455 Ma, 50 号岩管 422 Ma、462 Ma, 51 号岩管 463 Ma(董振信, 1994), 最老的年龄与张宏福和杨岳衡(2007)的结果相近。根据南京大学(2016)研究结果, 本区中生代存在两期(165 ~ 166 Ma 和 138 Ma)对金刚石矿床起破坏作用的岩浆事件(样品取自 30 号岩管钻孔中和 42 号岩管旁的闪长玢岩)。在矿田东部的早侏罗统砂砾岩中发现有金刚石砂矿。虽然山东蒙阴坡里地区金伯利岩带形成于中生代燕山晚期(褚志远等, 2019), 但目前辽宁还没有相似的研究成果见报。因此认为, 本区金伯利岩侵位于中寒武世之后侏罗纪之前。

本区金伯利岩体, 除 42 号岩管以外, 其它被称为岩管的金伯利岩体绝大部分仍具有脉的特征, 具有明显的拉长形态(以往将长宽比小于 10 的称为岩管)。以规模较大的 50 号和 30 号岩管为例, 地表形态以及钻孔控制的深部形态, 这两个岩体均具有厚大板状特征。平面上近等轴状的有 1 号、34 号、38 号和 75 号等小岩体(图 2), 但从钻孔控制结果看, 这些岩管深部有的与脉体相连, 比如 38 号与 111 号岩管通过岩墙连成一体。区内脉状金伯利岩体的边界与围岩清晰, 侵位时受断裂构造控制的特征明显。厚板状的岩管可能侵位于断裂构造的复合部位, 或者是不同方向断裂构造的交叉部位。由于脉状体未见角砾状金伯利岩或含金伯利物质角砾岩, 说明脉状体是沿压(扭)性断裂侵入的。

根据已有资料, 本区金伯利岩体在侵位后基本上未遭受太多的改造, 对岩体形态影响最大的是逆冲推覆构造。在进行三维建模过程中发现 30 号岩有被近水平断层错断的现象, 经过野外工

作发现矿田存在推覆构造体系, 初步判断该推覆构造形成于中晚侏罗世, 晚于金伯利岩侵位时间, 对区内金伯利造成了不同程度的破坏, 从而很好地解释了区内有些金伯利岩体向下延深不大或突然尖灭的现象。这套推覆构造体系, 从南东东向北西西方向运动, 在 50 号岩管附近可见该推覆构造线理产状显示构造面为倾角 15° 左右向南东倾、由 110° 向 290° 方向运动。位于矿田核心区东北部的 42 号岩管在钻孔控制的深度内未见明显错断的现象; 30 号岩管位于中部偏北的位置, 虽然被错断了但岩管基本上还是连续的, 钻孔资料和音频大地电磁测量结果未见明显的地层重叠现象; 南部的 50 号岩管则被彻底错断, 矿区地表可见不同岩性层多次重复, 钻孔岩心可见地层重叠现象, 音频大地电磁测量结果有重复出现的高低阻异常。重力剖面测量反演结果, 30 号岩管所在位置的地层受推覆构造影响而产生的折曲明显弱于 50 号岩管所在的位置, 30 号岩管受破坏的程度也弱于 50 号岩管。矿田南部金伯利岩体受逆冲推覆构造的影响明显大于北部。在逆冲推覆构造锋带局部可见规模不大的平卧褶皱导致地层发生倒转, 目前尚未发现金伯利岩被错断后发生倒转现象。

总体来看, 本区深大断裂提供了金伯利岩岩浆的上侵通道, 浅部压(扭)性断裂提供了就位空间。金伯利岩侵位后受到推覆构造的影响, 岩体形态发生了变化, 显现出西浅东深向东侧伏或向下突然尖灭的形态特征。也就是说, 本区影响金伯利岩体形态的主要因素是断裂构造, 岩浆侵位时断裂构造控制了岩体形态, 成岩后断裂构造对岩体形态进行了改造, 特别是逆冲推覆构造使部分金伯利岩体变成多个断块, 在开展深部找矿时需要对岩体的不连续性加以注意。

4.2 本区金伯利岩与深大断裂的关系问题

有研究认为, 瓦房店地区与郯庐断裂活动相关的北北东向断裂构造控制了金伯利岩的空间分布范围(赵建军等, 2011); 郯庐断裂的雏形出现在中生代的中央造山带东段(梁光河, 2018), 断裂开始形成于中、晚三叠世(万天丰等, 1996), 郯庐断裂北段左行

走滑断裂形成于 100 Ma 左右(窦立荣等, 1996); 有研究认为, 瓦房店地区的金伯利岩与晚侏罗世一早白垩世的大火山岩省的有关(曾普胜等, 2021); 瓦房店地区的金伯利岩可能在早古生代之前形成于华北地台之岩石圈底部, 而在中生代白垩纪时期才在大规模岩石圈拆沉的地质背景下快速上升(王十安等, 2021)。但目前尚无支持这些认识的测年数据。也有研究认为, 郯庐断裂带是一条长寿断裂, 具有长期复杂的活动历史。在《郯庐断裂》(国家地震局地质研究所, 1987)一书中记载: 李四光认为该断裂控制了辽东与辽西古生代沉积盆地; 徐嘉伟认为该断裂东支可能在太古代末产生, 长期继承活动; 黄汲清认为形成于前震旦纪, 中、新生代重复活动; 马杏垣认为元古代以前控制东北元古代褶皱带的构造发展, 主要活动期在中生代; 于丕休等认为太古代以来长期活动。另外, 有研究认为, 古郯庐断裂是震旦纪开始形成的(乔秀夫和张安棣, 2002)。本文认为, 区内金伯利岩受古郯庐断裂带的次级断裂控制, 郯庐断裂在本区至少在古生代就已经存在。

5 结论

本区金伯利岩成群、成带分布, 南西部以岩群为主, 中部以岩带为主, 东北部则以单岩体分布为主。根据岩体的化学成分, 岩群区的金伯利岩体受围岩成分混染的程度小于岩带区或单岩体区的金伯利岩。4 个大型原生矿床中, 位于岩群区的 50 号和 51 号岩管混染指数分别为 1.36 和 1.26, 小于 1.5 的判别标准; 岩带区的 30 号岩管混染指数为 1.5, 是岩带区混染指数最小的岩体; 单岩体区的 42 号岩管混染指数为 1.61, 高于 1.5 的判别标准, 因此认为岩群区的岩体更适合用于研究深部信息。

本区的金伯利岩与其它地区的金伯利岩相比, 地球化学特征和地球物理特征既有相似性也有独特性。影响岩体形态的主要因素是断裂构造, 断裂构造提供了岩浆上侵通道和就位空间, 成岩后的逆冲推覆构造对岩体形态造成了不同程度的影响。

致谢: 本文为辽宁省地质勘查项目“瓦房店金刚石整装勘查区增储专项”(编号: LNZC2019-0078-20)资助的成果。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、同事付出的辛勤劳动和大力支持, 感谢辽宁省第六地质大队有限责任公司总经理韩双、总工程师许洪斌给予的大力支持, 感谢审稿专家的悉心指导。

Acknowledgements:

This study was supported by Liaoning Province Geological Exploration Project (No. LNZC2019-0078-20).

参考文献:

- 安战锋, 贾志业, 王萌, 董丽娜, 张慧婷, 李健, 杨怡, 王鑫. 2017. 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, 41(1): 111-115.
- 褚志远, 王伟德, 吕青, 刘卫东, 康丛轩, 王树星. 2019. 山东蒙阴坡里地区金伯利岩带形成时代——来自辉绿岩锆石 U-Pb 定年数据的证据[J]. 地质通报, 38(1): 44-50.
- 董振信. 1991. 中国金伯利岩地球化学[J]. 地球学报, 12(2): 99-114.
- 董振信. 1994. 中国金伯利岩[M]. 北京: 科学出版社.
- 窦立荣, 宋建国, 王瑜. 1996. 郯庐断裂带北段形成的年代学及其意义[J]. 地质论评, 42(6): 508-512.
- 付海涛, 单学东, 康宁, 付海华, 万方来. 2017. 三维建模技术在 30 号岩管勘查中的应用[J]. 地球科学前沿, 7(5): 645-652.
- 付海涛. 2020. 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, 94(9): 2640-2649.
- 国家地震局地质研究所. 1987. 郯庐断裂[M]. 北京: 地震出版社: 8-11.
- 李开善. 1981. 构造体系对金伯利岩形成和分布控制作用的初步探讨[J]. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 1: 99-109.
- 李星云, 陶德毓, 张怀玉, 张秀华, 张丽华, 郭宏良. 1989. 辽宁金伯利岩地球化学特征[J]. 辽宁地质, (3): 193-205.
- 梁光河. 2018. 郯庐断裂带的几个关键问题探讨[J]. 黄金科学技术, 26(5): 543-558.
- 辽宁省地质局第六地质大队. 1980. 辽宁省普兰店-许屯西部地区金刚石原生矿初步普查地质报告[R]. 大连: 辽宁省地质局第六地质大队.
- 辽宁省地质勘查院. 2017. 中国区域地质志·辽宁志[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘世义, 孙吉生. 1993. 辽南金伯利岩的磁异常特征[J]. 地质科技情报, 12(S1): 14-20.
- 路凤香, 桑隆康. 2002. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社: 117-121.
- 南京大学. 2016. 30 号、42 号、50 号、1 号金伯利岩管典型矿床研究报告[R]. 南京: 南京大学.
- 齐玉兴, 施中爽, 韩柱国. 1998. 辽宁金刚石找矿与勘查[J]. 辽宁地质, (2): 111-125.
- 乔秀夫, 张安棣. 2002. 华北块体、胶辽朝块体与郯庐断裂[J]. 中国地质, 29(4): 337-345.
- 万天丰, 朱鸿, 赵磊, 林建平, 程捷, 陈进. 1996. 郯庐断裂带的形成与演化: 综述[J]. 现代地质, 10(2): 159-168.
- 张国仁, 仲米山, 潘玉敬, 付海涛, 李显东, 高永钊, 高福亮, 吴子杰, 王海鹏. 2020. 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, 29(3): 294-298.
- 张宏福, 杨岳衡. 2007. 华北克拉通东部含金伯利岩的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, 23(2): 285-294.
- 赵春强, 张志斌, 时溢, 石绍山, 尤洪喜, 李靖, 赵敬阳. 2018. 辽南金刚石成矿背景研究进展及讨论[J]. 地质与资源, 27(2): 149-159.
- 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.
- 王十安, 曾普胜, 刘斯文, 温利刚, 李睿哲, 赵九江. 2021. 金伯利岩: 地球深部探测的重要探针[J]. 地球学报, 42(6): 749-759.

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.

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.

References:

- AN Zhan-feng, JIA Zhi-ye, WANG Meng, DONG Li-na, ZHANG Hui-ting, LI Jian, YANG Yi, WANG Xin. 2017. A tentative discussion on the aeromagnetic flight method for the diamond survey in Wafangdian, Liaoning Province[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 41(1): 111-115(in Chinese with English abstract).
- CHU Zhi-yuan, WANG Wei-de, LYU Qing, LIU Wei-dong, KANG Cong-xuan, WANG Shu-xing. 2019. The formation age of the kimberlite zone in Poli area of Mengyin, Shandong Province: Zircon U-Pb dating of diabase[J]. Geological Bulletin of China, 38(1): 44-50(in Chinese with English abstract).
- DONG Zhen-xin. 1991. Geochemistry of kimberlites in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 12(2): 99-114(in Chinese with English abstract).
- DONG Zhen-xin. 1994. Kimberlites in China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- DOU Li-rong, SONG Jian-guo, WANG Yu. 1996. Chronology of the formation of the northern Tan-Lu fault zone and its implications[J]. Geological Review, 42(6): 508-512(in Chinese with English abstract).
- FU Hai-tao, SHAN Xue-dong, KANG Ning, FU Hai-hua, WAN Fang-lai. 2017. The application of 3D modeling technology in the No.30 kimberlite rock pipe exploration[J]. Advances in Geosciences, 7(5): 645-652(in Chinese with English abstract).
- FU Hai-tao. 2020. Analysis of kimberlite emplacement mechanism in the Wafangdian diamond ore field[J]. Acta Geologica Sinica, 94(9): 2640-2649(in Chinese with English abstract).
- Institute of Geology, China Earthquake Administration. 1987. Tan-Lu fault[M]. Beijing: Seismological Press: 8-11(in Chinese).
- LI Kai-shan. 1981. Preliminary study on the control of the formation and distribution of kimberlite by structural systems[J]. Chinese Geomechanics Research Academy of Geological Sciences, 1: 99-109(in Chinese with English abstract).
- LI Xing-yun, TAO De-yin, ZHANG Huai-yu, ZHANG Xiu-hua, ZHANG Li-hua, GUO Hong-liang. 1989. Geochemical characteristics of kimberlite from Liaoning[J]. Liaoning Geology, (3): 193-205(in Chinese with English abstract).
- LIANG Guang-he. 2018. Discussion on several key problems of the Tanlu fault[J]. Gold science and Technology, 26(5): 543-558(in Chinese with English abstract).
- Liaoning Sixth Geological Brigade. 1980. Preliminary survey geological report of primary diamond ore in Pulandian-Xutun western area of Liaoning Province[R]. Dalian: Liaoning Sixth Geological Brigade(in Chinese).
- Liaoning Provincial Institute of Geological Exploration. 2017. Regional Geology of China, Liaoning Province[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- LIU Shi-yi, SUN Ji-sheng. 1993. Magnetic anomalies of kimberlite in southern Liaoning[J]. Geological Science and Technology Information, 12(S1): 14-20(in Chinese with English abstract).
- LU Feng-xiang, SANG Long-kang. 2002. Petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 117-121(in Chinese).
- Nanjing University. 2016. 30, 42, 50, 1 Kimberlite pipe typical deposit research report[R]. Nanjing: Nanjing University(in Chinese).
- QI Yu-xing, SHI Zhong-shuang, HAN Zhu-guo. 1998. The prospecting and exploration of diamond deposits in Liaoning[J]. Liaoning Geology, (2): 111-125(in Chinese with English abstract).
- QIAO Xiu-fu, ZHANG An-di. 2002. North China block, Jiao-Liao-Korea block and Tanlu fault[J]. Geology in China, 29(4): 337-345(in Chinese with English abstract).
- WAN Tian-feng, ZHU Hong, ZHAO Lei, LIN Jian-ping, CHENG Jie, CHEN Jin. 1996. Formation and evolution of Tancheng-Lujiang fault zone: a review[J]. Geoscience (Journal of Graduate School, China University of Geosciences), 10(2): 159-168(in Chinese with English abstract).
- WANG Shi-an, ZENG Pu-sheng, LIU Si-wen, WEN Li-gang, LI Rui-zhe, ZHAO Jiu-jiang. 2021. Kimberlite: An Important Probe for Deep Earth Exploration[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(6): 749-759(in Chinese with English abstract).
- ZENG Pu-sheng, LI Rui-zhe, LI Si-wen, WEN Li-gang, ZHAO Jiu-jiang, WANG Shi-an. 2021a. Yanshanian Large Igneous Provinces in Eastern China: Magmatism-Tectonics-Resources-Environment Effects[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(6): 721-748(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guo-ren, ZHONG Mi-shan, PAN Yu-qi, FU Hai-tao, LI Xian-dong, GAO Yong-zhao, GAO Fu-liang, WU Zi-jie, WANG Hai-peng. 2020. Thrust nappe structure discovered in Wafangdian diamond metallogenic belt of Liaoning province[J]. Geology and Resources, 29(3): 294-298(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hong-fu, YANG Yue-heng. 2007. Emplacement age and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics of the diamondiferous kimberlites from the eastern North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 285-294(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Chun-qiang, ZHANG Zhi-bin, SHI Yi, SHI Shao-shan, YOU Hong-xi, LI Jing, ZHAO Jing-yang. 2018. Research progress and discussion on the metallogenic background of diamond in southern Liaoning[J]. Geology and Resources, 27(2): 149-159(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).
- 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).