Advances in Geosciences 地球科学前沿, 2023, 13(3), 292-303
Published Online March 2023 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ag
https://doi.org/10.12677/ag.2023.133028

Hans汉斯

华北地台金伯利岩的岩石矿物学及地球化学特征

司博文

桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室，广西 桂林

收稿日期：2023年2月24日；录用日期：2023年3月25日；发布日期：2023年3月31日

摘 要

金伯利岩因携带地幔捕虏体，使得人们得以研究地幔动力学、探讨岩石圈演化等重大科学问题，同时也因携带金刚石，使得工业、珠宝业等各行各业经济得以发展。但由于受到研究思路与手段的限制，金伯利岩的研究始终停滞不前。非洲、加拿大、俄罗斯、澳大利亚等国家至发现金伯利岩以来，金刚石产量遥遥领先，2016年全球的金刚石产量达到1.28亿克拉，排名前五位分别是俄罗斯、博茨瓦纳、加拿大、安哥拉、南非，中国金刚石的产量似乎一直没有突破。国内，金伯利岩型金刚石矿床产出背景主要在华北地台、扬子地台和塔里木地台大地构造单元。其中，具有重大开采经济价值的仅蒙阴与复县两处的含矿金伯利岩岩区，又以50号岩管的金刚石质量为上等。本文综述华北克拉通的发展与演化、华北地台金伯利岩区域地质构造与华北地台各岩区含矿金伯利岩的岩相学、矿物学、地球化学特征，旨在通过描述各岩区的金伯利岩的不同偏差，与金刚石的品味和质量是否具有关联性。

关键词

华北地台，金伯利岩，华北克拉通，蒙阴，复县

Petrography, Mineralogical and Geochemical Characteristics of Kimberlite in North China Platform

Bowen Si

Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Feb. 24th, 2022; accepted: Mar. 25th, 2023; published: Mar. 31st, 2023

文章引用: 司博文. 华北地台金伯利岩的岩石矿物学及地球化学特征[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(3): 292-303.
DOI: 10.12677/ag.2023.133028

Abstract

Because kimberlites carry mantle traps, people can study mantle dynamics and explore major scientific issues such as the evolution of the lithosphere. It is also because kimberlites carry diamonds, and industries like the jewelry industry have developed their economies. Due to the limitations of research ideas and methods, the research of Kimberlite has always been stagnant. Since the discovery of kimberlite in Africa, Canada, Russia, Australia and other countries, diamond output has been far ahead. In 2016, global diamond output reached 128 million carats. The top five are Russia, Botswana, Canada, Angola, South Africa, and China. Production seems to have not broken through. The production background of the Kimberley-type diamond deposit is mainly in the tectonic units of the North China Platform, the Yangtze Platform and the Tarim Platform. Among them, those with significant economic exploitation value are only the ore-bearing kimberlite rock areas in Mengyin and Fuxian, and the quality of the diamond of No. 50 rock tube is the highest. This article reviews the development and evolution of the North China Craton, the regional geological structure and petrology, mineralogy, and geochemical characteristics of the North China Platform Kimberley Rock. It aims to describe the different deviations of the Kimberley rocks in each rock area from the taste and quality of diamond is it relevant.

Keywords

North China Platform, Kimberley Rock, North China Craton, Mengyin, Fuxian

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

金伯利岩是起源最深的火成岩，它因携带的大量地幔捕虏体使得人们得以窥探地幔深部的各种科学问题，同时也携带大颗粒金刚石，引起各行业专家的重视。国外对于金伯利岩的研究开始于十八世纪末，而我国则稍微晚一些，在十九世纪中旬才引起重视。金伯利岩最早发现于南非，而在非洲目前已发现 21 座矿山，以博茨瓦纳、纳米比亚、南非、安哥拉、民主刚果这几个国家的采矿产量占比最多，其中，博茨瓦纳是世界上最重要的金刚石生产国。虽然如此，第一颗金刚石的发现却是在 1829 年于俄国发现，随后，俄国众多学者把注意力放到寻找金刚石矿身上，西伯利亚地台显然就是他们的主要研究对象，至进入 21 世纪后，俄罗斯的金刚石产量在过去 5 年内一直稳居世界第一。

华北地台是我国重要的金刚石成矿区，目前，已在山东、辽宁找到具有经济价值的金伯利岩型金刚石原生矿床。研究华北地台金伯利岩各岩区的区域地质概况、金伯利岩岩相学、矿物学、地球化学，结合已开采的原生金刚石矿床的金伯利岩特征，对于寻找品位高，规模大的原生金刚石矿床具有重要的意义。

2. 华北克拉通的演化与发展

华北克拉通是中国规模最大的克拉通(图 1)，其形成方式与时间一直存在不同的认识，早期学者认为华北克拉通形成时间主要在太古代，且是通过陆核的生长逐步形成(马杏垣等，1963)，部分学者提出微陆块拼贴模式(白瑾等，1993)。对于华北克拉通的形成与演化，许多学者也对其做出了不同的论述。太古宙末期埠平运动，华北地区历经剧烈的变质－变形作用，形成古陆核，奠定华北克拉通形成基础。古元古

代末期的吕梁运动，使得古陆核周边的地槽褶皱造山，形成古褶皱带把古陆核焊接镶嵌一起，形成华北克拉通。目前普遍承认的说法是微陆块拼贴模式，在此基础上，华北克拉通的构造演化被分为八个大的阶段：1) 陆核形成阶段；2) 陆壳巨量生长阶段；3) 微陆块拼合与克拉通化；4) 古元古代大氧化事件与地球环境剧变；5) 古元古代活动带构造与高级麻粒岩相变质作用；6) 中－新元古代多期裂谷与地球中年调整期；7) 古生代边缘造山；8) 中生代构造转折与去克拉通化[1]。

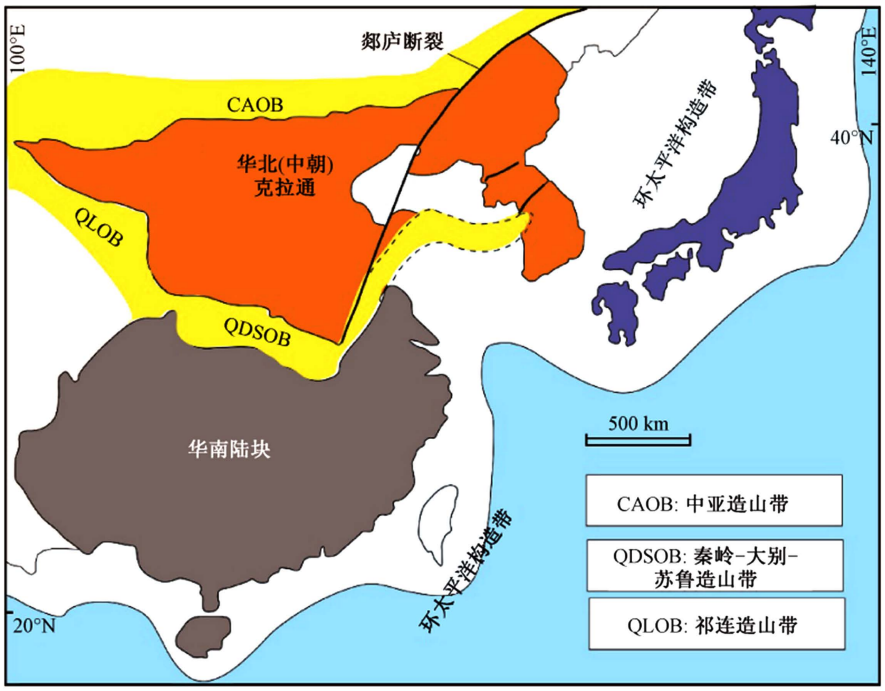


Figure 1. Sketch geotectonic map showing the North China (Sino-Korea) craton and related areas [1]
图 1. 华北(中朝)克拉通大地构造位置[1]

3. 华北地台金伯利岩的地质概况与金伯利岩的形成关系

3.1. 华北地台金伯利岩地质概况

华北地台形成与发展到目前已经有 38 亿年历史，是中国最古老的板块，华北地台位于阴山－燕山和秦岭－大别山两条造山带之间。在华北地台不同的地区，基底分别由太古界鞍山群、泰山群、阜平群、迁西群和登封群与下元界滹沱群、粉子山群、辽河群、胶东群及蒿山群变质岩组成。上部由变质很浅的中、上元古界和下古生界覆盖，两者呈不整合接触，盖层产状平缓。在华北地台金伯利岩出露地区，盖层主要由寒武系、震旦系和奥陶系组成，是一套较厚的浅海相碎屑岩和镁质碳酸盐建造，层位稳定，分布广泛，厚度达到 10~15 km。深大断裂为界包围着华北地台，数近于东西向和南北向的大断裂切割华北地台内部，使其成为几大断块，各断块表现为隆拗相间的构造格局。华北地台构成了 3 个古老基底隆起区，即东部胶辽－鲁西隆起、地台北缘内蒙地轴和西部的太行隆起。

3.2. 华北地台区与金伯利岩形成有关主要断裂带

金伯利岩的爆发侵入与华北地台的形成发展和构造活动极为密切，特别是与基底构造有直接关系。1) 郯庐断裂带：主导方向呈近南北向，局部地表出露呈北东向。北西向地幔隆起带的东北坡形成了常马

庄－西峪－坡里金伯利岩岩带，胜利 1 号岩筒可能是金伯利岩岩浆的爆发中心。在北西向地幔隆起带的南缘，有 27 号岩脉出露。郯庐断裂带两侧分布复县与蒙阴两大具有工业价值的金刚石矿床。此断裂带的发生具体年代尚待讨论，大部分学者认为其形成于中生代，也有学者认为其形成发展历史很长，始于震旦纪，于晚石炭纪暂时停止活动。2) 兴县－离石－临汾深断裂：深切基底，向北向南延伸展。是造成鄂尔多斯下陷和山西抬高的早期断裂活动带。3) 集安－桓仁－鞍山－锦州－承德－张家口－临河断裂带：内蒙地轴南缘一条主要深断裂。元古代华北地台形成后，沿此断裂北侧上升，南侧下降。在沿着桓仁－通化－集安一带发现金伯利岩。4) 柳河－铁岭－赤峰－白云鄂博断裂带：此断裂带为华北地台北缘东西向深大断裂之一。黄汲清等所指北缘断裂出露于河北、内蒙古中西部。在内蒙古龙头山发现的金伯利岩在此断裂带附近。5) 汾河断裂带：向北延至大同。在其北部水沟门发现含金刚石的金伯利岩。6) 石家庄－邢台－邯郸－安阳深断裂带：深切基底，往北向张家口方向延伸，向南延至郑州。河北张家金伯利岩的形成与其有关。7) 金县－宁河－应县－河曲－石咀山深断裂：在山西水沟门找到少含金刚石的金伯利岩，在东部复县发现原生金刚石工业矿床。8) 连云港－郯城－郑州－西安－洛宁断裂带。9) 乳山－桓台－邢台－介休深断裂带。

4. 华北地台金伯利岩岩省划分与主要岩区地质特征

4.1. 岩省划分

在华北地台分布着 9 个金伯利岩岩体群与 1 个钾镁煌斑岩岩体群。金伯利岩岩省指已成为金伯利岩岩浆源区的岩石圈克拉通化地区，而岩区指地理上或成因有密切相关联系的，且年龄相近的岩群。根据实际情况，华北地台被划分为 2 个岩省，9 个岩区。岩省被划分为冀鲁辽金伯利岩岩省与鄂尔多斯金伯利岩－钾镁煌斑岩岩省。

4.2. 主要岩区地质特征

4.2.1. 铁岭金伯利岩岩区

1975 年，铁岭金伯利岩被发现，其岩区位于华北地台北缘东西向铁岭－靖宇隆起带中，围岩为混合岩片麻岩和混合岩，属太古界鞍山群和下元古界辽河群，在此岩区内发现了 20 多个岩脉和岩筒。

4.2.2. 蒙阴金伯利岩岩区

该岩区是我国发现最早的金刚石原生矿产地，共发现 107 个岩体。位于鲁西断隆区，郯庐断裂的西侧。蒙阴地区金伯利岩由以雁列状排列的常马、西峪和坡里 3 个岩带组成。岩体大多产于泰山岩群片麻岩中，仅仅一部分产于寒武系灰岩中。根据 XRD 和电子探针的测试分析结果，样品中存在少部分黑云母－金云母的类质同象系列。

4.2.3. 应县金伯利岩岩区

该岩区位于山西省应县城东北 11 km 处，共发现 29 个岩体。该岩区处于山西台隆、燕山台褶带及内蒙地轴的交汇处。其南、西、北三边被大同裂陷盆地包围，北面为新生代大同火山群，南面为新生代五台县浦上玄武岩和繁峙玄武岩，形成走向近于南北的幔源岩浆活动带。

4.2.4. 复县金伯利岩岩区

辽宁复县金伯利岩区位于辽东地块的西部、华北地台东部和郯庐断裂以东，是我国最大的原生金刚石矿产区。复县金伯利岩岩区发现于 1971 年，在这里发现了 100 多个岩脉和岩筒。复县金伯利岩岩区内可分为三大岩带：南带以岩脉为主，岩体较小，含矿性差，中带较好，中带富含金刚石。其地质特征总体来说，分布于瓦房店以西长约 28 km、宽为 18 km 范围。

4.2.5. 涉县金伯利岩岩区

该岩区产于华北地台中部，山西台背斜前缘太行山隆起带南段的武安凹陷内。金伯利岩侵入寒武－奥陶系灰岩地层中，形成沿后匡门至张家界至王金庄的一条 15 km 长的金伯利岩。

4.2.6. 鹤壁金伯利岩岩区

该岩区位于山西中台隆和华北中断陷相接的汤阴断凹和太行山横断束的交接带的西侧北北东向断裂带中，构成南北长约 10 km，宽 4 km 的狭长带。围岩为中、下奥陶统，含燧石结核白云质灰岩与厚层纯灰岩等为主。

5. 华北地台金伯利岩岩浆活动的时代与划分意义

5.1. 岩浆活动时代

路凤香等人对含矿岩体所作的 Sm-Nd，Rb-Sr 等时年龄的整理以及其课题组在华北地台实验得出的钾镁煌斑岩的金云母 K-Ar 年龄[2]，得出数据，铁岭、蒙阴、复县、鹤壁四个岩区的 Sm-Nd 全岩模式年龄比较来看，鹤壁金伯利岩(425~375 Ma)最为年轻，蒙阴(658.7~594.5 Ma)较之老一些，复县(742~703 Ma)较之前两个岩区更老，但与铁岭相近，铁岭(1181~701 Ma)最老。与此同时，通过测年结果，路凤香等人认为金伯利岩岩浆于地幔－岩浆－CHO 体系中并处于一定的岩石圈动力学环境下形成[2]。同时，他们认为华北地台金伯利岩岩浆活动可以分为三个时期：1) 中元古代(1649~1181 Ma)钾镁煌斑岩和金伯利岩岩浆活动期，以鄂尔多斯陆核边缘山西阳高岩区为代表；2) 古生代金伯利岩岩浆活动(457~462 Ma)，以蒙阴和复县岩区、冀鲁辽陆核边缘的铁岭岩区为代表；3) 中~新生代金伯利岩岩浆活动时期(117~52 Ma)，以涉县和鹤壁岩区为代表。目前为止，金伯利岩年代学的研究目前还很初步，依旧存在着许多的问题，例如，晚侏罗世－白垩纪区域性隆起达到最大幅度；地貌反差加大并复杂化，构造－岩浆活动加强，是地台活化的剧烈期，这个时期的岩浆活动是否会导致已经形成的金伯利岩再一次发生变化。

5.2. 金伯利岩岩浆活动时期划分的地质意义

5.2.1. 确定原生金刚石的成矿时代

含矿矿床的形成时代一直以来都是一个需要解决的重要问题。Richardson (1984)提供了橄榄岩型金刚石中石榴石同生包体的 Sm-Nd 模式年龄数据[3]，推出金刚石结晶年龄多数早于金伯利岩。金刚石的结晶过程具有一个漫长的时间间隔，具有相当明显的阶段性和不连续性的特点，金刚石的成矿年龄也因此难以推出，但金刚石的成矿过程依赖金伯利岩岩浆的携带，因此，路凤香等人根据含矿金伯利岩岩浆的侵位时间作为原生金刚石的成矿时代，根据其所进行的 9 个样品实验得出，华北地台含矿金伯利岩的成矿时期为古生代奥陶纪时期。

5.2.2. 体现区域构造活动与地台型岩浆活动性的部分特征

路凤香等人对蒙阴、复县矿区金刚石中单斜辉石与石榴石的包体的平衡温、压计算[2]，得出他们的平均值分别为平衡温为 1184℃、平衡压为 6.75 GPa 与平衡温为 1123℃、平衡压为 6.3 GPa。在这种条件下，金刚石结晶才能存在于岩石圈 1000 Ma 以上，过热状态或软流圈上涌会使得金刚石发生燃烧，例如造山运动便伴随着高温。可见，华北地台古生代的稳定状态是金刚石形成的条件。然而，金伯利岩岩浆中携带的大量地幔捕虏体体现岩石圈处于一种拉伸状态，大陆克拉通的造陆运动看似是形成金伯利岩岩浆必要的大地构造背景，但关于华北东部岩石圈减薄机制还未取得广泛共识。值得说明的是，中奥陶世，华北地台发生大规模造陆上升，在这个时期，大量形成含矿金伯利岩，同时也是我国金刚石的主要成矿时期。

地台型岩浆活动与造山活动带产生的动力学背景不同，前者活动规模小，以深源者为主，地幔低温局部高而幅度较差，后者规模大，熔融温度高，区域内岩石圈伸展，挤压交替，并伴有地幔升温及软流圈上涌。

6. 华北地台金伯利岩的岩石学

6.1. 金伯利岩的定义

金伯利岩的定义迄今没有统一的共识，对于其定义的分歧，主要是涉及到地幔捕虏体和金伯利岩的相互关系、粗晶成因问题上。国外的近半个世纪以来，众多学者对金伯利岩的定义也有着差别。原苏联学者 Kovalski 曾主张将地幔捕虏体作为金伯利岩不可或缺的部分。Marakushev 提出碳酸岩浆使得石榴石二辉橄榄石侵入形成金伯利岩[4]。这些定义强调了地幔捕虏体的重要性，却并不肯定金伯利岩岩浆的存在。Mttchell 认为金伯利岩是一种富挥发分的钾质超基性岩类[4]。并且，他强调捕虏体不是必要成分，应将金伯利岩岩浆和巨晶包括在定义内。在国内，路凤香等人将金伯利岩定义为，其是处于地幔－岩浆－CHO 体系中，由地幔橄榄岩物质、CHO 以及低熔的钾质超基性熔浆为主要成分的流体，这三种组分固结形成的混杂岩为金伯利岩[5]。杨建民主张金伯利岩是一类富含挥发分的钾质超基性浅成－喷出岩，因有巨晶分布于基质中而呈现不等里结构[6]。张培强认为金伯利岩就是角砾云母橄榄岩，是大陆板块内部的，一种较其他岩浆来源更深的，独立高温岩浆作用产物[7]。杨志军等人则认为，金伯利岩是一种源于地幔深部、富含挥发分和钾质，快速上升至地壳浅部的偏碱性超基性岩[8]。

6.2. 华北地台金伯利岩类型

对于金伯利岩的分类，一直以来都是一个颇具争议的话题，不同的学者持有的观点有差异。最早提出对金伯利岩进行分类的是 Wagner，他认为金伯利岩至少有玄武质金伯利岩和煌斑岩状金伯利岩。Mitchell 将金伯利岩分为两类，富含橄榄石、基质钙钛矿、尖晶石和钙镁橄榄石的一组金伯利岩以及另一组以金云母为主的金伯利岩[9]。目前国内大多数学者按照成分以及结构构造，将金伯利岩分为，金伯利角砾凝灰岩、金伯凝灰角砾岩、细粒金伯利岩、含碎屑金伯利岩和含球状金伯利岩。本文采用周秀仲(1992)的分类方法[10]。

1) 粗晶金伯利岩：华北地台中，粗晶斑状金伯利岩石在华北地台中是最常见的金伯利岩，手标本多为灰绿、暗灰色，风化面颜色变浅，具有粗晶斑状结构及巨晶不等粒结构。显微镜下，橄榄石斑晶、粗晶、显微斑晶大多受到蚀变，但世代清晰。粗晶呈浑圆状，含量变化于 10%~40%，此外还可见到磷灰石、金云母、尖晶石、铬铁矿、磁铁矿、钙钛矿等矿物。山东胜利 1 号岩管中，粗晶与斑晶的总数量达到 61.4%，粗晶数量远远多斑晶，且其镁铝榴石捕虏晶含量也高于一般的金伯利岩。辽宁复县的粗晶斑状金伯利岩粗晶含量较低，低于 35%，鹤壁和涉县粗晶含量更少，大多情况下<10%，个别地区含量高。铁岭地区与柳林则未出现此类岩石。

粗晶斑状金云母金伯利岩是华北地台中较常见的金伯利岩类型。肉眼观察下，金云母的含量 > 5%的金伯利岩即粗晶斑状金云母岩石。除含金云母斑晶及粗晶外，还可见含量占有 30%~40%的橄榄石粗晶与斑晶。辽宁复县与铁岭可见此类岩石，这山东这类型岩石主要分布于 II、III 岩带。大同麻地沟的金伯利岩也大多属于这一类，此外，其还含有原生的透辉石，透辉石在华北地台的金伯利岩岩区中少见的矿物。涉县与柳林尚未见过此类岩石。

2) 金伯利岩质角砾岩

此类金伯利岩主要有金伯利岩质角砾岩和金伯利岩质凝灰角砾岩，岩石具角砾状构造。粒径 > 2 mm 的角砾，含量在 15%以上并被金伯利岩胶结即粗晶斑状金伯利角砾岩。角砾成分复杂，形状各异。山西

岩管中出现有金伯利岩角砾岩，分布不均。柳林的金伯利角砾岩呈浑圆－棱角状，脉状产出，含量达60%~80%。

3) 细粒金伯利岩

岩石常呈灰绿色，显微斑状结构，块状结构，碳酸盐化和蛇纹石化强烈。主要矿物为橄榄石、金云母和铬铁矿等。胜利 1 号小岩筒边部的细粒金伯利岩与粗晶金伯利岩呈过度关系。

4) 凝灰状金伯利岩

岩石具有凝灰结构、碎屑结构，斑杂构造。辽宁 30 号岩筒、50 号岩筒和山东红旗 6 号岩筒部分区域可见金伯利岩质角砾凝灰岩。

7. 华北地台金伯利岩的矿物学

金伯利岩的矿物种类具有多源性和复杂性，又因华北地台金伯利岩的强烈蚀变特征，给研究金伯利岩的造岩矿物和副矿物带来巨大的困难。系统的研究金伯利岩造岩矿物与副矿物的结构、成分与物理性质等，有利于揭示金伯利岩的成因与金刚石的信息。

7.1. 造岩矿物

7.1.1. 蛇纹石类

蛇纹石类矿物是金伯利岩中主要的矿物组分，大多数蛇纹石是由橄榄石蛇纹石化成的，呈橄榄石假象出现，这类型蛇纹石称为假象蛇纹石。山东与辽宁金伯利岩中，假象蛇纹石多为均匀致密状，颜色常呈浅绿、黑绿、黄褐与浅黄色，遭受风化作用强烈为灰白色，含有粉尘状等暗色矿物多呈灰黑色。透明或者半透明，油脂光泽，触之有滑感。假象蛇纹石的结构有两种类型，第一种呈浑圆状巨晶，粒径可达若干个 mm；第二种呈自形微斑晶，粒径一般小于 1 mm。池际尚(1988)等人认为，山东金伯利岩橄榄石的蛇纹石化产物主要以叶蛇纹石为主，有少量纤蛇纹石，无利蛇纹石，其假象蛇纹石主要由利蛇纹石和少量斜纤蛇纹石组成。

7.1.2. 金云母

金云母是金伯利岩的造岩矿物之一，按其形态大小可将金云母分为两大类：他形粗晶和自形微斑晶，具有熔蚀特征。向正英等人采集常马庄岩带中胜利 1 号岩管与西峪带红旗 6 号岩脉标本进行观察，标本中的金云母多呈浅黄色与棕黄色，显微镜下为无色－深黄棕色。颗粒较小。产状为基质云母与显微斑晶存在，基质云母为半自形－自形板状，风化和铁染程度强烈，蚀变程度强烈。辽宁复县金伯利岩中的金云母与山东的基本相同。

7.1.3. 碳酸盐矿物

碳酸盐矿物在金伯利岩与煌斑岩类常见，以方解石分布最广泛，含量可达到 85%，文石次之，最后还有少量碳锶石、碳钠钙石等。方解石以呈细粒、微细粒作为岩石的基质成分出现。常具有两种形态，一种呈半自形、他形斑晶，粒度 ＞2 mm，另一种以基质的主要组分出现，呈他形细粒。

7.2. 副矿物

金伯利岩中的副矿物对于找矿来说具有重要的指示意义，本文仅简写部分副矿物。

7.2.1. 石榴子石

石榴子石在金伯利岩中扮演非常重要的角色，是最重要的副矿物之一，同时具有强抗蚀变作用。目前，就石榴石的来源说法尚未得到共识，一般认为有种成因形式，第一种是直接由金伯利岩岩浆结晶而

成；第二种是来源深源捕虏体。就第二种形式来说，印度一位学者石榴石是通过捕虏体的破裂从而进入金伯利岩当中，但这不适用于橙红色团块状石榴石。石榴石的分类有多种，可以根据主要化学成分分类，J. B. Dawson 和 W. E. Stephens 根据石榴石中的主要成分 TiO_2、Cr_2O_3、CaO、FeO 与 MgO 的含量[11]，将石榴石分为十二个组；可以根据端元分子百分数分类，周秀仲(1992)划定端元分子百分数 > 10%者参与命名，最多取三个端元[12]。石榴石族中，最具有研究意义的是镁铝榴石，镁铝榴石是找寻金刚石的重要指示矿物，常呈微细粒、粗晶或巨晶存在，粒度变化较大。网状裂隙发育，沿着裂隙常充填次生矿物，例如蛇纹石、绿泥石与碳酸盐等，同时因为裂隙发育，常破碎成细粒的不规则碎块。

7.2.2. 尖晶石族矿物

尖晶石族矿物集中分布于基性与超基性岩中，是岩石中常见的矿物之一，也是金伯利岩的重要指示矿物。尖晶石族矿物在金伯利岩中，按照其结晶形态与生成时间，可分三个世代。第一世代，以斑晶形式出现，长期处于熔浆阶段，多数呈浑圆状出现。富矿金伯利岩岩体的以含第一世代浑圆状大斑晶尖晶石矿物为主，占总量 70%；第二世代八面体歪晶尖晶石族矿物，含量 < 25%；第三世代，小八面体尖晶石族矿物约占总量 5%。中矿带金伯利岩岩体中，以第二世代尖晶石族矿物为主，占总量 60%，贫矿带金伯利岩岩体中，则以第三世代尖晶石族矿物为主，占总量 75%。

尖晶石族矿物有多种，镁铁铬铁、铁镁铬铁矿主要见于蒙阴与复县两个富矿金伯利岩岩区中。镁铁铬铁矿、尖晶石－铬铁矿与铬铁矿－尖晶石主要见于铁岭与张家等金伯利岩岩区中，镁尖晶石与钛铁晶石－铬铁矿仅在山东 27 号金伯利岩岩脉中发现。

7.2.3. 富钛矿物

在华北地台金伯利岩中，各岩区的钛含量增加顺序为：铁岭－鹤壁－涉县－蒙阴－复县－应县－阳高。目前发现的钛矿物有钛钡铬石、钛钾铬石、钛铁矿－红钛锰矿、柱红石、金红石、锐钛矿、钙钛矿、沂蒙矿等。钛矿物在富矿金伯利岩岩区分布较少，仅见于山东蒙阴红旗 1、5、6、27 号岩脉、岩筒和胜利 1 号岩筒，以及辽宁 50、51、42、30 岩筒中。这些矿物仅在部分地区金伯利岩中发现，这是否启示我们，含钛矿物的成因与金伯利岩有着特定的联系？

7.2.4. 橄榄石

橄榄石是金伯利岩中数量最多的矿物之一。蒙阴、复县等金伯利岩中的蛇纹石基本上是由橄榄石蚀变成的，多呈浑圆状的橄榄石假象。在尾砂中可见细小的新鲜橄榄石碎块。橄榄石的来源有两种，一种粗晶橄榄石，还有一种是金伯利岩岩浆结晶的橄榄岩。

通过采集样品进行实验，周秀仲等人认为辽宁 50 号岩筒的橄榄石、山东胜利 1 号的橄榄石等可能来源于超基性岩捕虏体[12]。

7.2.5. 辉石

金伯利岩中的辉石主要来源于金刚石中的辉石、深源捕虏体中的辉石以及金伯利岩岩中的辉石斑晶。辉石在金伯利岩中比较少见。

8. 华北地台金伯利岩的地球化学

8.1. 主量元素特征

金伯利岩浆在上升的过程中，幔源物质、壳源物质的加入影响了金伯利岩的元素，使得金伯利岩受到混染而造成其主元素发生差异。Mitchell 提出受到混染的金伯利岩 $Al_2O_3 > 5\%$，$SiO_2 > 35\%$，未受到混染的金伯利岩 $Al_2O_3 = 0\%\sim5\%$，$SiO_2 = 25\%\sim35\%$ [5]。

郑建平等人认为，挑选自交代作用弱、风化作用影响不强与除去围岩捕虏体的样品进行研究，获得金伯利岩主元素地区性的总特征是极有可能的[13]。样品分别取自复县、蒙阴、铁岭、鹤壁、涉县、柳林、阳高、应县等八个地区。与世界各地的金伯利岩一样，华北地台的金伯利岩在主元素丰度上有较大的变化范围。复县岩区 50 号岩管的 46 个粗晶斑状金伯利岩样品得出的数据显示，金伯利岩 Al_2O_3，H_2O，Fe 以及 CO_2 变化范围大，意味着这可能与蛇纹石化、褐铁矿化以及碳酸盐化作用有关。蒙阴金伯利岩 CO_2、CaO、FeO 较低，MgO、H_2O、SiO_2、TiO_2 较高，这与蒙阴地区金伯利岩碳酸盐化作用不比复县的观察相同，同时证明了蒙阴地区金伯利岩粗晶橄榄石略高。阳高、柳林、应县具有低 SiO_2，CaO + MgO 的特点。鹤壁、涉县金伯利岩的 TiO_2、K_2O + Na_2O 低。铁岭金伯利岩具有高 P_2O_5、Al_2O_3、Fe_2O_3，低 TiO_2 的特点。

周秀仲等人就辽宁未混染的金伯利岩也进行了讨论[12]，样品共为 14 个，采自山东、辽宁。实验数据中，除去个别样品的差异，这 14 个未混染样品的 SiO_2、Al_2O_3 (wt%)和 Na_2O/K_2O 比值的变化范围与平均值为 SiO_2：3.21%~35.90%。

8.2. 微量元素

Clement 提出金伯利岩中的微量元素可以分为两大类，相容元素与不相容元素[14]。相容元素丰度与超基性岩相似，不相容元素丰度具有碱性岩特征。相容元素包括 Cr、Ni、Co、Cu、V、Zn 等，不相容元素呈现出 Cs、Ta、Th、Nb、Rb、P、Ba、Sr 富集。

8.2.1. 相容元素

山东与辽宁的相容元素含量均要高于国外部分金伯利岩，同时两者又有一定的区别。据周秀仲等人就山东与辽宁所取标本做的实验得出的结果来看[12]。山东金伯利岩的 Cr 和 Ni 的含量均要高于辽宁。山东 I 带金伯利岩中，Cr 含量 588~1810 mm，平均含量 943 ppm，Ni 含量 522~1353 ppm，平均含量 893 ppm。II、III 带金伯利岩中，Cr 100~1174 ppm，平均含量 648 ppm，Ni 70~895 ppm，平均 486 ppm，其中，I 带含矿量要高于 II、III 带，可知，富矿带的 Cr、Ni 含量要高于贫矿带。辽宁 50、51 号岩筒，Cr 含量 299~1073 mm，平均含量 788 ppm，Ni 含量 460~1081 ppm，平均含量 680 ppm，42 号、30 号岩筒金伯利岩中，Cr 含量 500~974 mm，平均含量 794 ppm，Ni 含量 524~820 ppm，平均含量 529 ppm。其中，50 号与 51 号岩管含矿量大于 40 号与 30 号，可知，富矿金伯利岩与贫矿金伯利岩的 Cr 含量接近，而富矿金伯利岩的 Ni 含量高于贫矿金伯利岩。

8.2.2. 不相容元素

山东与辽宁金伯利岩稀土元素球粒陨石标准化曲线向右倾斜，LREE/HREE 比值为 12.4~61.3，$(La/Yb)_N$ 比值为 22.7~357.9，可知为轻稀土富集型(表 1)。

Table 1. Range of REE geochemical parameters in Kimberlite [10]
表 1. 金伯利岩稀土元素地球化学参数[10]

	I	II	III	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ
ΣREE	316.6~541.7(5) (436.0)①(5)②	178.2~296.9(3) 827.2~876.6(2) (484.4)(5)	172.9~173.1(2) 939.8~1559.1(2) (711.2)(4)	210.3(1) 378.4~511.9(9) 621.3~958.5(3) (500.2)(13)	430.4~510.8(4) 912.5~1007.7(2) (633.6)(6)	464.4(1) 693.5~1390.7(3) (874.7)(4)
LREE	307.6~533.9(5) (405.3)(5)	173.3~289.2(3) 808.4~856.3(2) (472.4)(5)	159.8~164.1(2) 919.8~1514.4(2) (689.5)(4)	202.7(1) 356.3~494.6(9) 601.9~927.6(3) (480.6)(13)	419.9~497.0(4) 899.1~986.8(2) (615.4)(6)	429.6(1) 680.8~1368.3(3) (850.2)(4)

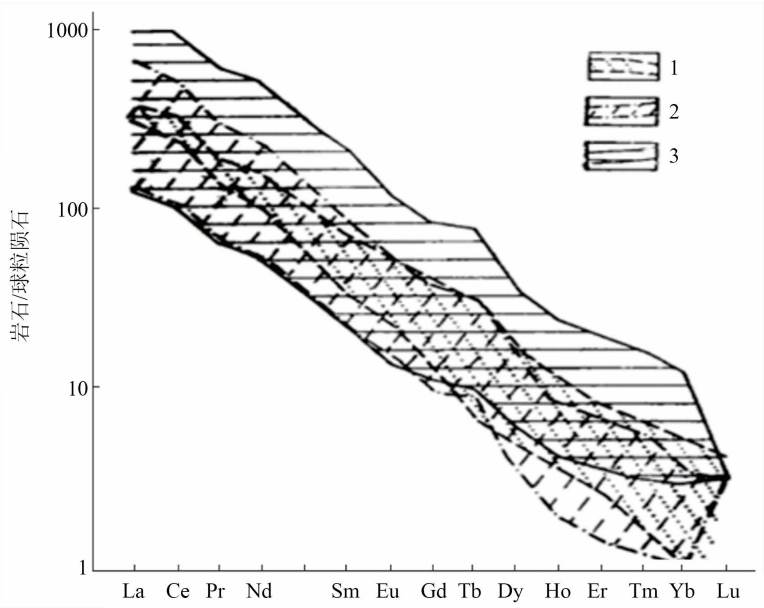
Continued

HREE	6.3~10.8 (8.7)(5)	4.9~40.3 (16.0)(5)	9.1~44.8 (21.7)(4)	7.6~30.9 (21.7)(13)	10.5~22.4 (16.6)(6)	12.7~34.7 (18.7)(4)
LREE/HREE③	34.0~57.7 (47.4)(5)	21.2~43.2 (33.1)(5)	12.2~46.1 (7.6)(4)	14.4~39.8 (28.0)(13)	36.0~40.0 (36.7)(6)	12.4~61.3 (40.2)(4)
$(La/Sm)_N$	7.6~11.1 (9.4)(5)	5.4~8.0 (6.9)(5)	4.6~5.8 (5.0)(4)	4.5~11.2 (6.8)(13)	5.5~9.7 (8.5)(6)	3.8~11.5 (7.8)(4)
$(Gd/Yb)_N$	5.5~15.4 (10.6)(5)	5.9~13.3 (12.2)(5)	3.6~18.6 (8.2)(4)	4.3~11.5 (7.4)(13)	6.3~10.7 (8.1)(6)	4.1~12.4 (9.7)(4)
$(La/Yb)_N$	87.0~357.9 (232.5)(5)	70.9~218.6 (150.7)(5)	31.4~251.3 (102.5)(4)	44.2~115.0 (93.9)(13)	70.0~160.9 (122.9)(6)	22.7~288 (174.2)(4)
δEu	0.75~0.98	0.82~0.97	0.80~0.96	0.77~0.99(12) 1.10(1)	0.71~0.95(3) 1.08(1)	0.79~0.89(3) 1.22(1)
Eu/Sm	0.20~0.27	0.22~0.27	0.21~0.28	0.24~0.31	0.2~0.31	0.23~0.25

① 平均值 ② 样品数 ③ LREE 为∑(La-Eu)；HREE 为∑(Gd-Lu)。I，II，III-山东金伯利岩体的 I，II，III 矿带；Ⅳ-辽宁 50、51 号岩管；Ⅴ-辽宁 42、30 号岩管；Ⅵ-辽宁(复县)1、2 和 59 号岩管。

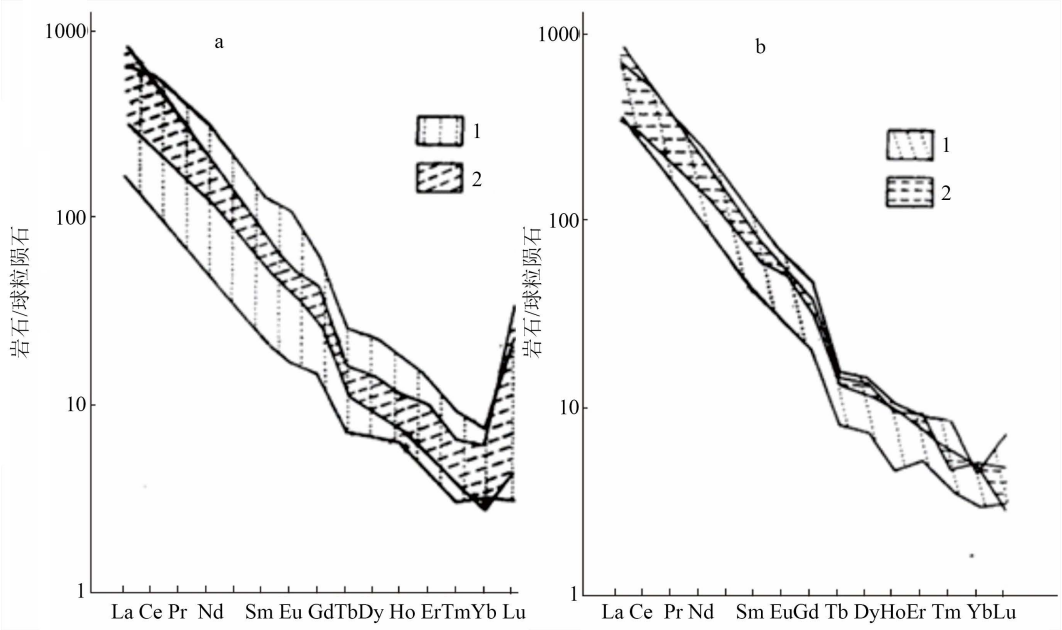
山东金伯利岩三个矿带的金伯利岩 REE 球粒陨石标准化曲线都向右边倾斜(图 2)，I 带至 II 带至 III 带，$(La/Yb)_N$ 比值依次减小，平均值分别为 232 至 150 至 102。LREE/HREE 和$(Gd/Yb)_N$ 比值呈现一次下降，说明 I 矿带最亏损 HREE。这可能与在 I 矿带(胜利 1 号)岩石形成过程中，有富 HREE 的相存在于残留相中有关。

辽宁金伯利岩稀土元素球粒陨石标准化形式与山东相同。富矿带的 ΣREE 集中于 378.4~511.9 ppm，中等含矿带 ΣREE 集中于 430.4~510.8 ppm，贫矿带 ΣREE 集中于 693.5~1390.7 ppm。而根据图 3，由富矿带至中矿带至贫矿带的 LREE/HREE、$(La/Yb)_N$ 比值逐渐增加，这与山东呈现相反的变化趋势。



1-I 矿带；2-II 矿带；3-III 矿带。

Figure 2. Chondrite-normalized REE patterns of the kimberlite from Shandong [10]
图 2. 山东金伯利岩 REE 球粒陨石标准化型式[10]



a.1-50 号；a.2-51 号；b.1-42 号；b.2-30 号。

Figure 3. Chondrite-normalized REE patterns of the kimberlite from Liaoning [10]
图 3. 辽宁金伯利岩 REE 球粒陨石标准化型式[10]

9. 华北地台金伯利岩区域成矿规律与远景观测

9.1. 区域成矿规律

1) 含金刚石矿的金伯利岩只产于古老地台区，基底时代一般为 25 亿年以上。古老隆起区附近，金伯利岩岩管规模大，含矿丰富，远离古老隆起区，含矿性差。

2) 大部分金伯利岩产于莫氏面隆起区或深度变化带上，另外金刚石原生矿区一般分布在大地热流值较低地区。

3) 金伯利岩分布区的区域重、磁场特征有一定的规律性。

4) 山东和辽宁的金伯利岩区受北东向郯庐大断裂的控制，复县金伯利岩主要受基底东西向隐伏断裂控制。

9.2. 华北地台金刚石原生矿远景预测

1) 辽宁瓦房店

在该区共发现 24 个岩管和 87 条岩脉，其中 50 号岩管是目前开采的原生金刚石矿中，金刚石品位最高的。除此之外，在该区找到的金刚石原生矿皆是根部相，岩体上部都被剥蚀。环渤海、黄海，从营口鲅鱼圈至长兴岛至普兰店，至大连至丹东沿海，该沿海带为寻找滨海金刚石砂矿空白区，有良好的工作前景。

2) 辽宁丹东－吉林集安

该区岩石圈厚度大，氧逸度低，有利于金刚石结晶保存。自 1970 年发现金伯利岩脉群在该区发现后，并未开展过金刚石找矿工作，可以将此地区作为金刚石原生矿床找矿有利地区。

3) 山东蒙阴－郯城

该区目前已有的原生矿、砂矿评价中，可知探明原生矿远景储量 421 万克拉，其中砂矿 D 级以上地质远景储量大约 5.3 万克拉。同时在该岩区发现大量镁铝榴石、铬铁矿，这些矿物作为金刚石指示矿物，

对于寻找原生金刚石矿具有重要意义。

4) 江苏宿州－新沂

在该区发现大量金刚石等，例如泗县山头共发现 64 颗金刚石与上千颗镁铝榴石，屏山地区发现铬镁铝榴石 15 颗，栏山地区发现 53 颗金刚石，其中颜色不一、净度较好。

10. 结论

由于受到科学技术与研究思路的限制，金伯利岩的研究还存在着局限性，例如金伯利岩岩浆活动时代、金伯利岩原始岩浆组分、金伯利岩成因与含矿性等等，关于这些问题，众多观点，各说纷纭，没有得到统一。

金伯利岩一直以来都受到许多学者的关注。在过去 150 年里，国外发现的 7 个金伯利岩大矿在不停的开采下，已经接近油尽灯枯。在国内，能够寻找到的有价值的原生金伯利岩型金刚石矿床有山东常马庄矿和辽宁瓦房店矿，目前这两个矿在深部开采中。笔者通过对比华北地台各金伯利岩岩区的区域地质条件，主微量元素特征等，得出如下结论：

1) 强大的断裂带与岩浆爆发中心的附近更容易见到品位高的金刚石，且断裂带基底越古老，金刚石埋藏的可能性越大。

2) 金伯利岩岩浆大多以中心式喷发，但是其形成于高温高压上地幔条件下，当岩浆冲出地表，在地表的低温低压环境下失去平衡而裂解，最后许多不稳定矿物会风化消失，然而类似于镁铝榴石、金刚石、铬铁矿物理稳定性高，抗风化能力强的矿物，保存下来的几率要比橄榄石、金云母等高得多。

3) 如果能在稳定的地形中发现镁铝榴石、铬铁矿的大量存在，是否可以指示金刚石同时也存在着。

参考文献

[1] 翟明国. 华北克拉通构造演化[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 722-745.

[2] 路凤香, 赵磊, 邓晋福, 郑建平. 华北地台金伯利岩岩浆活动时代讨论[J]. 岩石学报, 1995(4): 365-374.

[3] Richardson, S.H., Gurney, J.J., Erlank, A.J., *et al*. (1984) Origin of Diamonds in Old Enriched Mantle. *Nature*, **310**, 198-202. https://doi.org/10.1038/310198a0

[4] Marakushev, A.A. (1982) The Fluid Regime in the Formation of Diamond-Containing Rock. *International Geology Review*, **24**, 1241-1252. https://doi.org/10.1080/00206818209451065

[5] Mitchell, R.H. (2013) Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry, and Petrology. Springer Science & Business Media.

[6] 杨建民. 山西北部金伯利岩钾镁煌斑岩岩石学矿物学研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 1995: 1-135.

[7] 张培强. 山东金伯利岩岩管成因[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.

[8] 杨志军, 黄珊珊, 陈耀明, 李晓潇, 曾璇, 周文秀. 金伯利岩演化过程及金刚石含矿性评价的研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(7): 700-707.

[9] Mitchell, R.H. (1995) Kimberlites and Orangeites. In Kimberlites, Orangeites, and Related Rocks, Springer, Boston, 1-90. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1993-5_1

[10] 周秀仲, 杨建民, 黄蕴慧, 秦淑英. 山东和辽宁金伯利岩的稀土元素地球化学特征[J]. 1990, 9(4): 300-308.

[11] Dawson, J.B. and Stephens, W.E. (1975) Statistical Classification of Garnets from Kimberlite and Associated Xenoliths. *The Journal of Geology*, **83**, 589-607. https://doi.org/10.1086/628143

[12] 周秀仲, 黄蕴慧, 秦淑英, 高岩, 杨建民. 山东、辽宁金伯利岩中石榴石的类型、标型特征及其与金刚石的关系[J]. 岩石矿物学杂志, 1991(3): 252-264.

[13] 郑建平, 路凤香, 赵磊, 王柏轩, 毛文清, 宋更河. 华北地台古生代金伯利岩(包括金刚石)中流体及其在地幔演化中的作用[J]. 大地构造与成矿学, 1996(2): 105-118.

[14] Clementc, R. (1982) A Comparative Geological Study of Some Major Kimberlite Pipes in the Northern Cape and Orange Free State. University of Cape Town, Cape Town.