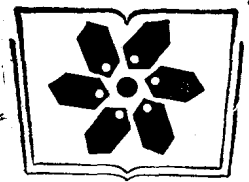


# 华北地台金伯利岩 及古生代岩石圈地幔特征

池际尚 路凤香 等 著

科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

# 华北地台金伯利岩 及古生代岩石圈地幔特征

池际尚 路凤香 等著

科学出版社

1996

(京)新登字 092 号

### 内 容 简 介

本书是我国现今有关金伯利岩及金刚石原生成矿条件最为系统、全面的研究成果,它不仅提供了华北地台含矿和不含矿金伯利岩的岩体地质、岩石类型、矿物组合、地球化学特点、同位素年龄及上地幔的组成、化学和物理状态等方面的最新资料,并在这些资料的基础上进行了综合分析研究,提出了一些新的观点和看法。它不仅在理论方面作出了贡献,而且对于今后在这一领域的研究工作提供了重要的依据。

本书可供从事岩石、地球化学、地球物理和金刚石矿床研究的科研、教学人员参考。

## 华北地台金伯利岩 及古生代岩石圈地幔特征

池际尚 路凤香 等著

责任编辑 谢洪源

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1996 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1996 年 8 月第一次印刷 印张: 18 3/4

印数: 1—500 字数: 431 000

ISBN 7-03-005189-0/P·896

定价: 45.00 元

## 参加本专著撰写工作的作者名单

池际尚 路凤香 赵磊

赵崇贺 郑建平 邓晋福

张宏福 李佑国 莫宣学

黄鹏

## 前 言

本专著是地质矿产部基础地质研究项目《华北地台金刚石原生矿床成矿理论及找矿方法研究》的主要成果，项目经费由地质矿产部科学技术司提供，同时受到国家教育委员会博士点基金及国家自然科学基金委员会的资助。

研究工作是在地质矿产部科技司直接领导下进行的，在工作中得到了地质矿产部直管局、辽宁地质六队、山东地质七队、河南地质十三队、山西 212 地质队、河北石家庄综合地质队和建筑材料工业部 701 矿的领导、地质工作者、岩矿及重砂鉴定工作者的帮助与支持，在此一并表示衷心的感谢。

本项目的第一负责人池际尚院士，自 1965 年起领导和指导了山东及全国金刚石找矿及研究工作，在这一领域作出了卓越的贡献。1974 年她对我国金刚石成矿特征、金伯利岩成因及深部条件作了精辟的分析，形成了在她领导下的研究集体的基本学术思想。她重视野外工作及室内岩相学研究，主张无论分析测试技术多么先进，这两项基础绝对不能忽视与偏废。在实际工作中她一丝不苟，从严要求，为人表率。她鼓励自己的助手和学生去开拓新的领域。1994 年 1 月 1 日她与世长辞，但她对后人的教导将作为宝贵的财富永远留在我们心中。这本专著是她长期进行金伯利岩与金刚石找矿研究的重要成果之一，出版此书将是对她的纪念和缅怀。

本研究项目于 1986 年立项，项目负责人是池际尚与路凤香，参加工作的教师有赵磊、赵崇贺、郑建平、任迎新、莫宣学、邓晋福、孟庆祝、喻学惠，研究生有黄鹏、黄锦江、张宏福、李佑国、杨建军、舒小辛、杨军、叶维坤等。立项后对金刚石原生矿产地辽宁复县和山东蒙阴两个金伯利岩岩区、含金刚石的辽宁铁岭金伯利岩区，河南鹤壁、河北涉县、山西应县等三个金伯利岩区，山西阳高金伯利岩及钾镁煌斑岩岩区以及相关岩石的产地河北涞源、北京平谷、甘肃礼县、山东日照等地区进行了野外及室内研究。

作为本专著的课题研究(即本书的第一稿)完成于 1992 年 9 月，同年由科技司委托中国地质大学(北京)科研处组织评审，评审的专家有宋叔和院士、鄂莫岚研究员、刘若新研究员、张培元高工、柯元硕高工、邱家骧教授、孙培基高工等七人。成果鉴定书指出：“所提交的成果是迄今华北地台有关金伯利岩型金刚石原生矿成矿地质理论研究达到国际先进水平和有权威性的一份重要报告”，“该项研究思路是先进的、科学的，为该区最为全面、系统、既有理论意义又有实际价值的成果”。各章节的分工为：第一章，池际尚、路凤香；第二章，邓晋福、赵崇贺；第三章，赵磊、郑建平、赵崇贺；第四章，路凤香；第五章，赵磊；第六章，郑建平、赵磊；第七章，赵崇贺、李佑国、莫宣学；第八章，路凤香、郑建平；第九章，路凤香；主要结论，池际尚、路凤香；最后由路凤香统一修改定稿，池际尚最后审定。在评审工作后，对第一稿进行了修改，并增加了一些新的资料。修改工作主要由路凤香负责，赵磊、郑建平参加了第五章及第六章的修改。全书的图件由赵磊负责审查，参考文献由郑建平统一整理。

研究项目中重砂分离及鉴定工作由任迎新高工负责，项目中有关金刚石包裹体的温度、压力及氧逸度的计算是由马鸿文教授编制程序并协助进行的，在出版过程中，研究生郭晖协助进行了校对工作，廊坊物探队绘图室进行了图件的清绘，在此一并表示感谢！

作者

1994年12月

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 绪论</b> .....	池际尚、路凤香 ( 1 )
第一节 国内外研究概况.....	( 1 )
第二节 研究思路与主要观点.....	( 4 )
<b>第二章 华北地台的构造格局及其与金伯利岩岩浆活动的关系</b> .....	
.....	邓晋福、赵崇贺 ( 7 )
第一节 金伯利岩与大地构造的关系.....	( 7 )
第二节 金伯利岩、金刚石与深部构造的关系.....	( 8 )
第三节 华北地台的构造格局.....	( 10 )
第四节 华北地台金伯利岩形成的大地构造背景.....	( 13 )
<b>第三章 华北地台金伯利岩(钾镁煌斑岩)岩省划分及岩体地质</b> .....	
.....	赵 磊、郑建平、赵崇贺 ( 16 )
第一节 岩省和岩区划分.....	( 16 )
第二节 各主要岩区地质特征.....	( 16 )
<b>第四章 华北地台金伯利岩的岩相学</b> .....	路凤香 ( 33 )
第一节 国外学者对金伯利岩下的定义.....	( 33 )
第二节 本书对金伯利岩的定义.....	( 34 )
第三节 金伯利岩的分类.....	( 36 )
第四节 华北地台金伯利岩产出的相条件.....	( 40 )
第五节 华北地台金伯利岩的岩相学.....	( 42 )
第六节 小结.....	( 52 )
<b>第五章 华北地台金伯利岩矿物学</b> .....	赵 磊 ( 55 )
第一节 橄榄石及其蚀变矿物.....	( 55 )
第二节 石榴子石.....	( 61 )
第三节 尖晶石类矿物.....	( 76 )
第四节 云母.....	( 94 )
第五节 富钛矿物系列.....	( 106 )
第六节 辉石.....	( 115 )
第七节 元素互化物及自然元素.....	( 127 )
<b>第六章 华北地台金伯利岩的地球化学</b> .....	郑建平、赵 磊 ( 133 )
第一节 主元素特征.....	( 133 )
第二节 微量元素.....	( 145 )
第三节 同位素地球化学.....	( 161 )

<b>第七章 华北地台的钾镁煌斑岩</b> .....	赵崇贺、李佑国、莫宣学	(179)
第一节 饮牛沟钾镁煌斑岩岩体地质.....		(179)
第二节 岩石类型.....		(179)
第三节 矿物学特征.....		(183)
第四节 地球化学.....		(202)
第五节 饮牛沟钾镁煌斑岩的成因探讨.....		(209)
<b>第八章 华北地台古生代岩石圈地幔特征及深部过程</b> .....	路凤香、郑建平	(215)
第一节 华北地台古生代岩石圈地幔的组成.....		(215)
第二节 华北地台金伯利岩的形成条件及成因.....		(266)
第三节 流体特征.....		(271)
第四节 华北地台金刚石的成因讨论.....		(272)
第五节 华北地台克拉通化后岩石圈地幔的演化.....		(274)
<b>第九章 有关金刚石原生矿找矿的几个问题讨论</b> .....	路凤香	(275)
第一节 原生金刚石的成矿时期.....		(275)
第二节 含矿金伯利岩形成的构造条件及找寻岩石圈根的方法.....		(277)
第三节 与含矿金伯利岩共生的岩石及应用它们寻找岩石圈软弱带的方法...		(279)
第四节 含矿金伯利岩的岩相学及地球化学标志.....		(280)
第五节 含矿金伯利岩的矿物学标志及重砂法找矿.....		(281)
第六节 华北地台找矿远景区的选择.....		(282)
<b>主要结论</b> .....	池际尚、路凤香	(283)
<b>主要参考文献</b> .....		(288)



# 第一章 绪 论

金伯利岩是自然界起源最深的火成岩,也是一种不常见的岩石类型,但它在经济上和岩石学上的重要地位是其他火成岩所不能与之相提并论的。之所以如此,是因为在经济价值上它与金刚石这一昂贵、永恒的宝石资源有着极为密切的联系,在学术价值上通过对它的研究可获得迄今为止地球内部最深的天然样品,了解深达 200km 的地幔岩石圈状态。本专著将华北地台的金伯利岩、古老岩石圈及金刚石找矿作为研究的对象,也正体现了三者在经济价值与学术价值上的重要关系。本章将简要介绍它们的研究概况与本专著的主要思路。

## 第一节 国内外研究概况

1870 年以前仅发现以砂矿产出的金刚石,采自河流砾石层和古老砾岩中。1870 年在南非首次发现了杜突依斯潘 (Dutoitspan) 岩筒,1871 年在金伯利城附近连续发现了金伯利 (Kimberley)、得彼尔斯 (DeBeers)、巴尔特富坦 (Bultfontein) 等含矿岩筒,1902 年发现了南非最大的普莱米尔 (Premier) 岩筒,并在其中采出了重 3 075.25 克拉的世界最大的宝石级金刚石,自此揭开了研究金刚石原生矿床的重要历史阶段。

1950 年以前,由于所发现的原生金刚石矿都在南非而且都毫无例外地赋存于金伯利岩中,因此研究工作都集中于南非并把原生金刚石与金伯利岩紧密地结合在一起。许多重要的论点与假说在这一时期被提出,并直到现在仍有着相当的影响,例如: Hager (1905) 提出金伯利岩中许多矿物是超基性岩包体的解体矿物; Wagner (1914) 把金伯利岩划分为两大类:玄武质的和煌斑质的(云母的),这种划分成为 70 年代原苏联岩石学家对金伯利岩进行分类的基础; Shand 和 Holmes (1936) 认为金伯利岩是黄长玄武岩(黄长岩)加上二辉橄榄岩的碎块,这对以后原苏联学者认为金伯利岩的基质相当于橄榄黄长岩以及 Dawson (1977) 主张的金伯利岩是出现于碱性-碳酸岩杂岩中的一员的观点有着重要的影响。有关金刚石的成因,则是以岩浆结晶占主导地位。对金伯利岩中的超镁铁质岩包体的成因,则存在着同源成因与捕虏体的两种观点,这两种观点的争论直到现在尚未完全结束,尽管目前捕虏体成因占优势。

50—70 年代初期,在世界范围内,包括我国在内,金刚石找矿工作有了重大的进展,含金刚石的金伯利岩不再仅限于南非,在坦桑尼亚、莱索托、美国克罗拉多—怀俄明、原苏联雅库特等地都陆续找到了相当规模、具经济价值的含矿金伯利岩,我国在这一阶段也陆续在贵州、山东和辽宁发现了含矿岩体及具经济价值的原生金刚石矿床。由于所发现的含矿岩体绝大多数仍是金伯利岩,因此金刚石成矿条件的研究依旧是集中于对金伯利岩岩体产出、形成地质条件以及金伯利岩的岩石特征、岩浆起源等方面的讨论。在这一时期重要的进展之一是完善了金伯利岩筒的岩相特征,特别是确定了存在表生及火成成因的

碎屑金伯利岩,并命名为火山口相,这一认识被以后众多学者所采用。此外有影响观点还有 Dawson (1962, 1966, 1967, 1970) 所提出的金伯利岩浆的流体化侵位特征与中心杂岩体模型,后者是指金伯利岩可与碱性岩及碳酸岩组成杂岩体,但这一观点一直存在争议,包括了金伯利岩、碳酸岩以及含云母的某些煌斑岩是否与金伯利岩属同一岩类的问题。

对金刚石形成条件的研究也有进展,提出金伯利岩浆只有在深部保持了大量挥发分的聚集,且由此造成的高压状态能一直持续到岩浆上升到地壳的较高部位,才有利于金刚石的结晶与保存,特别是当岩浆上侵至地壳,挥发分在围压降低的条件下产生膨胀、爆发,从而造成超高压状态可为金刚石的结晶制造有利的环境。这一阶段国外的研究成果相当丰富,特别是原苏联科学家不仅对含矿金伯利岩岩筒产出的构造部位、岩石共生组合、分类及矿物学方面作了全面的总结,而且在找矿工作中应用了重砂法及磁法都获得了有效的成果。

我国在 60 年代中期至 70 年代初,对贵州、山东及辽宁三处的金伯利岩及相关岩石也作了一定程度的研究工作,但当时金刚石列为绝密矿种,成果很少发表。中国地质大学师生曾参加了对山东蒙阴地区含矿岩体及金刚石原生矿的综合研究,并对我国金伯利岩作了较全面的总结<sup>1)</sup>,这一成果代表了我国当时的研究水平,以下认识至今仍值得采用、借鉴。

1) 我国的金伯利岩可划分为两大类,一种为以山东及辽南为代表的玄武岩型金伯利岩,另一种为以贵州为代表的煌斑岩型。

2) 提出了寄主岩化学成分与含矿性的关系,在主元素方面提出了含矿性的判别式,指出  $TiO_2$ 、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $Al_2O_3$  等氧化物含量愈高岩石的含矿性愈差;微量元素 Cr、Ni、Co、Nb、Y 可作为寻找金伯利岩的化探指示标志。

3) 提出了我国含矿金伯利岩的伴生矿物类型(高铬镁铝榴石、富镁铬铁矿、镁钛铁矿等)及矿物化学特征。

4) 论证了自然界存在金伯利岩岩浆,并非碳酸岩浆或碱性岩浆的派生物。该岩浆富含  $CO_2$  且为原生成因。在山东红旗 6 号岩体中发现的二辉橄榄岩团块不是同源成因,是地幔成因的捕虏体,变形强烈的金云母粗晶不是岩浆结晶的斑晶,而是深部来源的捕虏晶。这些认识在当时尚处于争论或略处于劣势,直到 80 年代才被广泛加以确认。

5) 分析了山东、辽南金伯利岩管、岩脉的侵位机制及构造控制,对在已知岩区进一步发现新的岩带起了一定的作用。

上述认识已不断地被以后 20 多年的研究与找矿工作所证实。然而在当时,由于条件的限制对金刚石的变形特征未能涉及,因而只确定了金刚石为金伯利岩浆处于爆发阶段的结晶产物,这是不够全面的。

70 年代中期以后,由于分析技术的发展,使得对金伯利岩及金刚石找矿指示矿物的成分获得了广泛、精确的资料,从而可以应用这些成果来研究金伯利岩浆的起源及演化,在第一次金伯利岩会议之后(1973 年,南非开普敦),对金伯利岩的研究和认识步入了详尽和定量化的阶段,对金伯利岩的分相模式、岩浆的分异作用、岩浆起源的温、压条件以及

1) 池际尚,1974,关于我国金伯利岩的几个问题,北京地质学院科研报告。

其中二辉橄榄岩的平衡温压范围都作了不同程度的讨论,并开始将金伯利岩岩浆作用与板块活动进行联系。1981年在法国克莱蒙费朗召开的第三次金伯利岩会议上,展出了西澳发现的含矿超钾质的钾镁煌斑岩,并引起了极大的震动,这一发现冲破了金伯利岩是唯一的含金刚石寄主岩的认识,并引导了各国学者对某些金伯利岩名称的重新厘定,如美国阿肯色州草原溪的金伯利岩实际上就是钾镁煌斑岩。

80年代初期的另一个重大进展是确认了金刚石大多数是金伯利岩浆的捕虏晶。自1889年在南非金伯利岩的榴辉岩捕虏体中发现了金刚石后,部分地质学家就提出金刚石为捕虏晶的观点,但当时大多数人认为榴辉岩是金伯利岩的同源包体,因而金刚石仍为最早期岩浆结晶的产物。1977年Kramers对金伯利、芬什(Finsch)和普莱米尔矿山金刚石中的硫化物包裹体进行了年龄测定,获得了模式年龄大于2000Ma,而金伯利岩的侵位年龄为90Ma,这表明金刚石早在前寒武纪就已晶出。1984年Richardson从金伯利和芬什矿山的金刚石的石榴子石包裹体获得了Rb-Sr及Sm-Nd模式年龄为3200—3300Ma,提出是太古宙的结晶产物。从结晶年龄及金伯利岩侵位年龄存在差别表明,多数金刚石不是寄主岩岩浆结晶的,而是在地幔中早已形成的,岩浆起了运载工具的作用。但必须注意的是,在他们测定金刚石包裹体的年龄数据中,也有一定数量年轻的、且与寄主岩岩浆侵位年龄相同者(Kramers, 1977; Richardson, 1986, 转引自Gurney, 1989)。而这一事实往往被不少人忽视。

由于上述发现,相应的金刚石成矿理论及模型也不断提出,其中以Boyd等(1986)和Haggerty(1986)的见解影响最大。前者认为,根据南非的情况,含金刚石的金伯利岩分布于太古宙克拉通内,不含矿的分布在克拉通周围的元古宙活动带内,太古宙克拉通对应着软流圈下凹的顶面;元古宙活动带对应上凸的软流圈顶面。这一成果为找寻金刚石提供了深部构造制约的模型。Haggerty(1986)不仅重视了岩石圈特征而且讨论了上地幔流体的氧逸度对形成金刚石的作用,推测了金刚石形成的三种途径:太古宙的粗大金刚石是长期作用的产物;太古宙下沉的洋壳转变为榴辉岩在伴随的升温中形成与硫化物共生的粗粒金刚石;金伯利岩喷发前在岩石圈底部上升的碳、氢、氧流体因氧逸度改变形成的微粒金刚石。他还提出在克拉通内部,岩石圈厚度大、温度低,因而金刚石-石墨相转变界线所要求的深度较浅(120km±),这样形成金刚石的范围宽。此外,由于地幔在克拉通内部亏损程度高,金伯利岩多携带方辉橄榄岩型的金刚石。在克拉通边部金伯利岩可携带榴辉岩型金刚石,在克拉通周围的元古宙活动带,软流圈顶面位置上隆,地温高,金刚石-石墨相转变界线变深(约200km),因而含金金刚石较贫。在上述两模型的基础上,不同人又有一些修改,如霍桑强调了地台边部因俯冲带影响可以形成钾镁煌斑岩型金刚石矿床的有利位置。

与此同时,自1980年起开展了国际岩石圈研究之后,人们对大陆岩石圈进行了多学科、多方位的全球对比,特别是从岩石圈动力学的角度来探讨其演化过程,这对金刚石找矿理论的发展能起到有益的作用。例如Clifford(1966)曾提出过含金刚石的金伯利岩都限定在刚性克拉通核(rigid cratonic nuclei)内部,时代>2Ga。1984—1991,Janse提出了将克拉通划分为三种类型:Arton(基底为太古宙,简称A型)>2.4Ga,Proton(元古宙基底,P型)2.4—1.6Ga,Tecton(新元古代基底,T型)1.6—0.8Ga,认为有经济价值的含矿金伯利岩产于Arton之上,含矿的钾镁煌斑岩则产于Proton,并主张

Clifford (1966) 的规律仍然适用。与此同时,测试技术迅速发展,为研究工作提供了保证。看来,和其他领域一样,金刚石成矿理论研究的前景也是与相邻学科的进展息息相关的,是在高潮与低潮相间的状况下前进的。

我国自 70 年代初期以后,金刚石找矿工作没有重大突破,研究工作也处于低潮。80 年代初西澳发现钾镁煌斑岩型金刚石矿床对我们有启发,自此逐步开展了新一轮的找矿及科研工作。1988 年地质矿产部制定了“金刚石特别找矿计划”,并与英国契切斯特公司合作对山东、辽宁进行了综合找矿。随着国际学术交流逐渐增多,围绕金刚石找矿工作展开的研究也不断深入,并出现了一批有意义、水平高的成果。山东地质矿产局第七地质队自 1980 年起陆续进行了有关金伯利岩、指示矿物及成矿预测等方面的研究工作,并以研究报告的形式提供了成果,包括“山东金伯利岩”(李杏村等,1981,全国第一次基性超基性岩及蛇绿岩讨论会会议文集)、“山东金伯利岩与偏碱性超基性岩碳酸岩及暗色岩的关系”(万国栋等 1983 年,山东第七地质队)、“我国金伯利岩岩石矿物特征及其与相似岩石的区别”(1981,山东第七地质队及山东地质局实验室)、“山东金伯利岩指示矿物的综合研究”(任喜荣等,1988,内部研究报告)、“山东金伯利岩同位素地质学研究”(朱源、毛治海等,1989,内部研究报告)、“中国金刚石原生矿成矿预测研究报告”(山东第七地质队,1991,研究报告)等。宜昌地质矿产研究所在“6.5”期间开展了 II 型金刚石的研究,并正式发表其成果:“II 型金刚石形成的地质条件探讨”(刘观亮等,1989,宜昌地质矿产研究所所刊)。地质科学院矿床研究所完成了“金刚石找矿指示矿物研究及数据库”(张安棣等,1991,北京科学技术出版社),并在引进国外有关金刚石成矿理论及找矿方法方面作了大量有价值的工作,曾在《国外矿床地质》以两期专辑的形式系统地翻译及综合了国外研究的最新成果。黄蕴慧等(1991)出版了《华北地台金伯利岩与金刚石》,董振信(1993)出版了《中国金伯利岩》。辽宁六队自 1982 年起对复县地区的金刚石原生矿进行了研究,完成了“辽宁省复县金刚石原生矿地质研究报告”(庄德厚等,1982,内部资料),近年来又完成了“复县及铁岭两地区的金刚石隐伏矿床成矿预测研究报告”(内部资料)。这些成果都大大提高了我国在这一领域的研究程度。除此之外,还有不少有关介绍金刚石成矿的新理论(张培元等)及地区性或指示矿物的文章发表,在此不一一列举。但从以上所列举的研究成果看出,前人多侧重于对成矿预测、指示矿物及地区性的地质学、岩石学的研究,而对华北地台金伯利岩及金刚石成矿条件的基础地质研究还比较少。前人的研究多数以研究报告、内部资料的形式表达,而作为正式出版物供科技界公开交流、学习者较少。

总之,我国在这一领域的研究与国外相比还有差距,但目前在众多研究工作者的努力下差距在逐渐缩小,在某些方面已处于同步的状态。

## 第二节 研究思路与主要观点

本专著研究的主要对象是金伯利岩及赋存于其中的金刚石资源,将岩石圈地幔-金伯利岩岩浆-CHO 流体-金刚石,作为统一的四元体系,并置于岩石圈的动力学环境中进行研究是主要思路,这样利于揭示其中的内在联系,深化研究程度,增强找矿后劲。

我们认为金伯利岩并不是单一的熔浆结晶的产物,而是一种充满晶体(地幔及深源物质解体物)、充填了流体(广义的)及有时数量并不占绝对优势的硅酸盐熔体的三种组分固

结而成的。这不仅还适用于橄榄钾镁煌斑岩，或许在火成岩领域中能有更广泛的适用范围。三种组分各自在岩相学、地球化学、矿物学及岩石的含金金刚石性上都有所体现。这一观点贯穿于全书的各章节中。三种组分中源区地幔物质加入的愈多，含金金刚石愈好，因为具经济价值的粗粒金刚石多数是地幔捕虏晶。池际尚(1974)曾提出，应用金伯利岩的主元素来判别其含矿性的公式： $T.A. = TiO_2 + Al_2O_3 + K_2O + Na_2O + P_2O_5$ ，若  $T.A.$  为 4—6.5 时含矿好，6.5—9.5 含矿差， $> 9.5$  基本无矿。上述元素均为熔浆的组分，它们在地幔橄榄岩中含量低。因此这种关系恰恰反映了岩浆组分含量过高，地幔物质含量则过低对含矿性不利的事实。赵磊(1988)对山东胜利 1 号大、小管及红旗 6 号管金伯利岩中粗晶橄榄石(地幔橄榄岩解体矿物)含量与含金金刚石性的趋势面分析表明，两者呈正相关关系，Wilson (1989)总结的世界范围内金伯利岩的  $Mg/(Mg + Fe)$  值愈高含金金刚石愈好。这些都支持了上述的认识。流体组分在早期地幔交代，金伯利岩浆发生熔融过程中起的作用早已被人们所认识。除此以外，它在冲碎、支解地幔物质，在岩石圈底部金刚石的结晶作用，在深部流体透入岩浆中造成局部低温、低  $f_{O_2}$  环境致使晚期金刚石的晶出及再生长过程等方面所作的贡献也不可低估。三种组分在金刚石成矿作用中缺一不可，并且要求最佳的配比。基于此，尽管金刚石结晶年龄多数早于金伯利岩浆侵位年龄，但他们是处于统一的岩石圈动力学环境中，成矿则是由一些有关联的深部作用所完成。

多数有经济价值的金刚石结晶于古老岩石圈底部，低的地温、厚的岩石圈根、深部流体的活动及低的  $f_{O_2}$  是金刚石晶出与长期保存的必要条件。金伯利岩浆发生于岩石圈或岩石圈/软流圈的交界处，它能够分凝上升并携带金刚石而不被岩浆所熔化，最终到达地表，也需要有特定的深部动力学条件，因此古老岩石圈的组成、热状态、岩石圈根的厚度、氧逸度也是本专著的研究重点。华北地台东部(太行山以东，冀鲁辽陆核)在中、新生代普遍活化，软流圈顶界抬升，岩石圈根遭到侵蚀，几乎有近 120km 厚的岩石圈根发生规模不等的拆沉或破坏，因此相当于金伯利岩浆主要活动时期，古生代时的岩石圈已经不能应用现代地球物理资料做出恢复，必须依赖于对那个时期的金伯利岩浆活动所携带的捕虏体的研究，配合以岩浆的反演才能获得古老岩石圈根的模式。揭示出古老岩石圈状态不仅对找寻金刚石有很重要意义，而且对查清中国东部岩石圈根的破坏与消失及其演化的动力学都有重大意义。

据前人工作，金刚石的原生包裹体主要可分为 P 型(具橄榄岩组合)及 E 型(具榴辉岩组合)两类，暗示金刚石在被寄主岩浆捕虏前是赋存于橄榄岩及榴辉岩中。目前所发现的含金金刚石的寄主岩浆除金伯利岩与钾镁煌斑岩外，还有在西伯利亚北部库土依(Kutui)碱性超基性杂岩中，西澳超基性煌斑岩与碱性煌斑岩以及叙利亚西北部碳酸盐化碧玄岩爆发岩筒中发现过金刚石，但都不具有经济价值。含金金刚石的橄榄岩及榴辉岩除了以捕虏体发现于金伯利岩及钾镁煌斑岩中外，呈岩体产出的上述两类岩石也发现过金刚石。我国西藏罗布莎及东巧方辉橄榄岩，包括其中的铬铁矿矿石中发现了金刚石(梁日暄等，1984)，最大的 0.75mm。原苏联也报道过乌拉尔纯橄榄岩中含金刚石，最近在摩洛哥北部方辉橄榄岩中呈层状或捕虏体存在的石榴石辉石岩中发现了石墨化的金刚石，金刚石已全部转变为石墨但仍保存八面体及菱形十二面体的假象，最大者边长 12mm，且含量高。榴辉岩中的金刚石均呈石榴子石、辉石及锆石的包裹体产出，原苏联北哈萨克斯坦含榴辉岩的片麻岩中(Sobolev et al., 1989)和我国大别山榴辉岩中(徐树桐等，1991)都有

产出,最大的在石榴子石中呈包裹体存在的金刚石为  $60\mu\text{m}$ 。这表明,在深度、温度、 $f_{\text{O}_2}$  适宜及有原生碳及碳流体中存在的环境,就存在晶出金刚石的可能性。但从目前资料,那些底辟侵位或剪切侵位或俯冲至地幔深处又折返上升的岩体中的金刚石都因品位低不具经济价值,尽管它们也未曾经历过明显的高温环境。要想对上述问题做出较完满的解释,要依赖于对形成金刚石的总体动力学环境及流体或熔-流体在结晶与保存金刚石的作用方面的研究。本书中尽管对流体的研究尚处于初步探索的阶段,所强调的两种流体:流体 1 (岩浆分异晚期者,相当于一般所指的岩浆中的挥发分)和流体 2 (深部上升的还原流体)及地幔热流体柱等概念也还不够完整与成熟,但我们相信这将是地学领域中一个有意义的研究课题。

在研究方法上,我们坚持重视野外工作和岩相学研究,在此基础上应用先进的测试技术做出配套的分析;将地质、矿物岩石及地球化学的研究有机的结合;研究中应用了岩石、物理化学及热动力学的理论与方法查清岩浆源区及岩石圈根的物理化学状态;在学习、理解国外有关这一领域的最新理论时,努力与我国华北地台的实际情况相结合,以建立起这一地区金伯利岩浆起源、岩石圈根及金刚石成矿模型。

# 第二章 华北地台的构造格局及其 与金伯利岩岩浆活动的关系

## 第一节 金伯利岩与大地构造的关系

### 1. 金伯利岩的地质产出

金伯利岩是大陆板内岩浆作用的产物。最初, Clifford (1966) 认识到, 金伯利岩岩浆活动局限于古老克拉通地区。截止目前, 世界上主要的大陆克拉通地区(例如南非、西伯利亚、西非、南美、北美、澳大利亚、印度、俄罗斯白海滨阿尔汉格尔斯克), 包括中国大陆上的华北地台、扬子地台、塔里木地台均分布有金伯利岩, 证明了 Clifford(1966)认识的正确性(Dawson, 1986; Mitchell, 1986; Pasteris, 1984)。金伯利岩形成时代, 从元古宙(1950Ma)直至新生代(20—30Ma), 从世界范围来说, 晚侏罗世—白垩纪是金伯利岩岩浆活动的主要时期(Pasteris, 1984; Dawson, 1986)。通常, 产生金伯利岩的克拉通地区有一个很老的太古宙核(>2400Ma), 并镶嵌着比较年青的元古宙造山带的边缘(>1000Ma)(Mitchell, 1986), 从构造上来说, 克拉通地区至少已稳定达500Ma(Pasteris, 1984)。有经济意义的含金刚石的金伯利岩多数限于有一个太古宙(>2400Ma)基底的克拉通, 典型的克拉通常常被显生宙的地台沉积物和相伴的大陆火山岩所覆盖, 金伯利岩常常分布于具这种地台沉积盖层的克拉通地区, 比较少数重要的金伯利岩省分布于已暴露出古老太古宙核的克拉通地区(Mitchell, 1986)。Janse(转引自张安棣, 1990)按年龄将世界克拉通划为三个亚类, 并总结出: ①太古宙克拉通(Arton), 基底克拉通化年龄大于2400Ma, 世界金伯利岩型金刚石矿床皆分布于太古宙克拉通上; ②元古宙克拉通(Proton), 基底克拉通的年龄大于1600Ma, 世界钾镁煌斑岩型金刚石矿床分布于元古宙克拉通上; ③后生或构造克拉通(Tecton), 基底固结年龄小于1600Ma, 无金刚石原生矿床分布。

### 2. 金伯利岩与大地构造的关系

Mitchell (1986) 曾对这个问题作了系统的评述。有人推测, 金伯利岩与大陆裂谷作用(continental rifting)相伴随。但是, 世界上主要的大陆裂谷区, 如东非、莱茵、奥斯陆、贝加尔等著名裂谷系中无金伯利岩产出。因此, 并无证据说明金伯利岩与大陆裂谷作用有成生联系。俄罗斯学者认为, 克拉通内部的金伯利岩分布受深断裂的控制, 并常常用金伯利岩的分布来圈定位于地台沉积盖层下面的深断裂, 这被称为造陆断裂作用(epeirogenic faulting)。俄罗斯雅库特省的金伯利岩分布在地台沉积盖层的构造挠曲点(flexure points)附近, 这些挠曲点是大的造陆隆起与凹陷的分界, 这些挠曲点被看作为基底中深断

裂的位置。Bardet (转引自 Mitchell, 1986) 把这个原则推广到非洲, 认为金伯利岩分布于大盆地的边缘。但是, 这一认识与南非陆壳构造的当代观点不符合, 那里金伯利岩产于盆地中心, 金伯利岩是拉张应力环境下上隆作用时期内形成的。看来, 在一个地区适用的假说并不一定能适用于另一个地区。Taylor (1984) 指出, 北美东部金伯利岩形成的年龄从南西一侧的石炭纪—二叠纪向东北方向递减到晚侏罗世—白垩纪, 这一趋势与大西洋沿这个方向的开启年龄相符合。因此, 认为北美东部金伯利岩的侵位(emplacment)与大西洋开启(opening)同时产生的应力有关。热点(hot spots)或地幔热柱(mantle plumes)被认为是产生金伯利岩岩浆的原因。Crough 等(转引自 Mitchell, 1986)认为, 许多侏罗纪后形成的金伯利岩, 如北美、南美和非洲的金伯利岩分布于大默托尔(Great Meteor), 特林达迪(Trindade)和特里斯坦(Tristan)热点5度范围之内, 因此, 金伯利岩形成与热点有关。但是, 大多数金伯利岩并没有表现出热点轨迹(hot spot tracks)特点, 它亦不能解释在一个地区、在一个长时间内金伯利岩侵入活动的重复出现, 亦无法解释为什么不是每个热点均伴随有金伯利岩的产生。Sharp (1974) 认为, 金伯利岩是由于消减的洋壳在700km深处的局部熔融形成。Helmstaedt 等(1984, 1986)认为, 金伯利岩中的榴辉岩捕虏体是消减洋壳的残留物, 消减洋壳的脱水和去碳酸盐化反应引起上覆地幔的交代作用与局部熔融, 并认为消减带在南非和西非是比较浅的(150—300km)。但是, 它无法解释为什么在北美浅的消减带上面的活动带没有金伯利岩。还有的提出金伯利岩与环绕古老克拉通核分布的同心与放射性构造有关; 金伯利岩与大洋转换断层向大陆延伸的构造有关等。Mitchell (1986) 在评述后认为, 控制金伯利岩定位的浅部构造与控制岩浆从地幔上升的构造是不相同的, 岩石圈软弱带的再活化对金伯利岩定位可能起着主要的控制作用, 岩浆作用可以诱发于岩石圈下面的地幔热柱的上升, 因此, 金伯利岩岩浆作用不与转换断层的拉伸作用、消减带或热点伴生, 亦不出现在主要的大陆裂谷区。

从上面的讨论中, 我们可以看出, 关于金伯利岩与大地构造的关系还存在许多分歧。

## 第二节 金伯利岩、金刚石与深部构造的关系

### 1. 80年代的主要进展

金刚石内矿物包裹体的 Rb-Sr、Sm-Nd 模式年龄表明, 多数金刚石形成的年龄大大早于金刚石的寄主岩——金伯利岩, 南非的许多金刚石形成于太古宙岩石圈底部, 然后在白垩纪作为捕虏晶被金伯利岩岩浆携带至地表(Meyer, 1985; Boyd et al., 1986; 邓晋福, 1989)。当然, 如第一章所述, 金刚石仍然存在多种成因, 但具经济价值者则以捕虏晶为主。金伯利岩浆的形成与金刚石结晶的环境处于相互联系的统一体系中。因此, 只有当深部构造条件既符合于金刚石的形成, 同时又符合于金伯利岩岩浆的形成时才有可能在近地表或地表形成金伯利岩型原生金刚石矿床。Boyd 等(1986)的多年研究表明, 南非卡普沃尔(Kaapvaal)克拉通有一个岩石圈根(root), 形态上犹如造山带的根一样, 这个克拉通根主要由强烈亏损玄武岩组分的橄榄岩构成。软流圈顶面在克拉通下面为170—190km, 而在克拉通周边的活动带下面约为140km。克拉通根形成于3000Ma前, 那时的温度为900—1200°C, 金刚石就是在太古宙时在这个根内形成的。金伯利岩内橄



榄岩捕虏体与金刚石内橄榄岩型矿物包裹体的温、压与现代地盾地温符合,与南非地区现代热流测定结果符合,位于金刚石稳定区,在5GPa时, $t < 1100^{\circ}\text{C}$ ,位于含 $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ 的橄榄岩固相线之下,所以橄榄岩中金刚石是在低于固相线的温度下结晶或交代成因的。金刚石内榴辉岩型包裹体在5GPa时, $t > 1100^{\circ}\text{C}$ ,所以,榴辉岩中金刚石可能是岩浆成因的。含金刚石的金伯利岩岩浆来源于加厚的岩石圈下面的软流层或岩石圈底部,不含金刚石的金伯利岩岩浆则来源于减薄的岩石圈下面的软流层,亦即太古宙克拉通对应着下凹的软流圈顶面,周边的元古宙活动带对应着上凸的软流圈顶面,前者就是Boyd等(1986)所说的太古宙克拉通根。这样,金刚石形成的深部构造条件是需要有一个较冷的加厚的岩石圈或较冷的克拉通根。金伯利岩岩浆的形成需要一个C-H-O流体环境,并在地幔深部出现一个小的热扰动(Wyllie, 1987)。

## 2. 几点认识

从上面的讨论中可以看出,关于金伯利岩与大地构造的关系还存在较多问题。但是,关于金伯利岩、金刚石与深部构造的关系目前则趋于明确。我们认为,在讨论金伯利岩、金刚石形成时,深部构造更为重要,岩石圈浅部构造条件是第二位的,基于这个认识,本章主要从深部构造条件来分析金伯利岩与大地构造的关系。据此,我们提出与金伯利岩、金刚石有生成联系的岩石圈性状与构造特征的四点重要科学事实与认识。

1) 金伯利岩岩浆活动主要限于大陆克拉通地区,多数金伯利岩型金刚石矿床分布于太古宙克拉通(Arton)上。这不但为金伯利岩金刚石矿床的悠久开采历史所证实,亦被近年来新的找矿实践所证实,一个突出的例子是俄罗斯新发现的阿尔汉格尔斯克岩区的金伯利岩型金刚石矿床是太古宙克拉通,而大部分俄罗斯地台属元古宙克拉通(Proton),所以虽在顿涅茨克发现了金伯利岩,但都不含金刚石。这个科学事实实质上反映了太古宙克拉通具有一个较冷的加厚的岩石圈。另外,金刚石矿床主要分布于具地台型沉积盖层的克拉通地区。相对来说,已暴露出古老陆核和地盾地区可能已达金伯利岩侵入体的根部位置,所以其含矿性劣于前者。

2) 金刚石的形成需要一个克拉通根(或加厚的岩石圈)以及较冷的岩石圈,符合正常的地盾地温以及低的地表热流值。这实质上反映了一个已长久在构造上稳定的岩石圈,岩石圈的加厚是软流圈逐渐冷却转变的结果,所以岩石圈的加厚与较冷状态是构造上长期稳定的两个主要现象(或事实)。只有在这个条件下在岩石圈根部才有逐渐结晶出金刚石的温、压条件。

3) 金伯利岩岩浆的形成需要地幔较深部的正常热结构有一个小的扰动。强调“小的扰动”是因为没有热结构的扰动,就不可能形成金伯利岩岩浆。同时,只有小的扰动才能不破坏较冷的岩石圈热结构,致使晶出的金刚石不转变为石墨,而在金伯利岩岩浆中保存下来并被带到地表或近地表。“小的扰动”指偏离正常地温的不大的温度升高,这亦是金伯利岩岩浆形成所要求的,如果偏离正常地温过大(即较大的热结构),那末,地幔源岩的局部熔融程度必增高,这时就不会形成金伯利岩岩浆,而形成苦橄质玄武岩岩浆,这就是为什么太古宙克拉通地区出现金伯利岩型金刚石矿床的内在原因。

4) 大陆克拉通的造陆运动(epeirogeny)是形成金伯利岩岩浆的必要的大地构造背景。我们所以没有强调造陆断裂作用,是为了避免由于名词的重复(见前面的讨论)出