

山东省鲁西金刚石的类型、源区及区域壳幔演化背景

宋明春¹⁾, 余西顺²⁾, 宋英昕³⁾, 肖丙建²⁾, 周登诗²⁾, 高存山²⁾, 冯爱平²⁾

1) 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东威海, 264209;

2) 山东省第七地质矿产勘查院, 山东临沂, 276006;

3) 山东省地质科学研究院, 国土资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东济南, 250013

内容提要:山东省鲁西地区具有工业价值的金刚石矿有原生金刚石矿和金刚石砂矿两种类型, 前者的母岩类型主要有金伯利岩型和煌斑岩型; 后者的母岩类型有砾岩型和砂岩型, 产于第四纪小埠岭组 and 于泉组中。寒武纪李官组、石炭纪本溪组、侏罗纪三台组、古近纪官庄群和新近纪白彦组也是金刚石的储集层, 但均达不到工业利用的要求。这些储集层中所含的金刚石比较而言, 蒙阴和费县等地的本溪组中的粒度最大, 平邑—泗水地区白彦组中的含量最富, 临沂金雀山三台组中的完整晶型者占比最高, 枣庄上泥河和泗水堽庄地区李官组中的金刚石熔蚀、磨圆最严重。不同层位和类型的金刚石, 其源区、形成时代和构造背景不同。岩相古地理分析表明, 李官组金刚石来源于其西南侧马山—四海山一带早前寒武纪结晶基底中的超镁铁质岩, 这些超镁铁质岩形成于新太古代, 元古宙末早前寒武纪结晶基底隆起, 超镁铁质岩遭受剥蚀, 少量金刚石沉积于寒武纪底部的李官组砾岩中; 本溪组和三台组金刚石的分布和特征指示其源区为蒙阴金伯利岩, 蒙阴金伯利岩形成于早—中奥陶世, 金伯利岩形成之后发生的加里东运动和印支运动—早燕山运动造成鲁西中部的徂徕山—蒙山一带隆起, 金伯利岩被抬升至地表遭受剥蚀, 金刚石分别沉积于本溪组和三台组砾岩中; 官庄群、白彦组、小埠岭组 and 于泉组中金刚石的分布和特征指示其源区也主要是蒙阴金伯利岩, 新生代鲁西北部的徂徕山—蒙山隆起仍然处于强烈隆升状态, 造成白彦组、小埠岭组 and 于泉组的金刚石富集区均分布于鲁西的南部区域。不同时代金刚石源区的地幔地球化学性状明显不同, 华北陆块自太古宙至古元古代地幔源区的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +0.5 \sim +4$, 指示上地幔处于弱亏损状态; 鲁西金伯利岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化于 $-4.78 \sim +2.76$, 暗示鲁西早古生代地幔总体处于弱富集状态; 鲁西中生代镁铁质岩石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于 $-9.2 \sim -21.21$, 说明地幔于中生代发生强烈富集。鲁西金伯利岩型金刚石原生矿源自于早古生代弱富集地幔。

关键词: 金刚石; 储集层; 不整合; 地幔; 构造运动; 山东鲁西

山东省鲁西地区出产金刚石, 自古就有金刚石出土的记载和传说。解放前, 国内没有开展过专业的金刚石资源调查, 仅有日本人和德国人分别调查和开采过金刚石砂矿。1957 年山东省成立了金刚石专业地质队伍(沂沭地质队, 后更名为 809 队, 现为第七地质队), 拉开了金刚石矿勘查、开发的序幕(Luo Shengxuan et al., 1999)。1965 年在山东蒙阴地区发现了我国第一个具工业价值的金刚石原生矿, 目前已评价了金刚石砂矿 5 处, 探明大型金刚石原生矿 2 处, 发现金刚石原生矿带 3 条(Kong

Qingyou et al., 2006), 累计探获金刚石原生矿资源储量约 1590 万克拉。尤其是, 近年来深部找矿取得重要进展, 在蒙阴常马和西峪矿区深部新增金刚石资源量均达大型以上规模, 最大勘查深度已达 2300 m, 而且发现了钾镁煌斑岩型金刚石和深部隐伏的金伯利岩管(周登诗, 2015; Wang Yufeng et al., 2019)。通过调查、普查工作, 在鲁西地区共发现金刚石出土点 294 处、金刚石伴生矿物出土点 774 处, 出土金刚石 6344 颗, 发现镁铝榴石 9742 颗, 高铬铬铁矿、铬透辉石等 2000 余颗, 确定了寒武

注: 本文为山东省重点研发计划(软科学项目)(编号 2019RKB48002)、山东省泰山学者建设工程专项经费(编号 ts201511076)和山东省重点研发计划(编号 2017CXGC1604)资助的成果。

收稿日期: 2020-02-17; 改回日期: 2020-06-04; 网络发表日期: 2020-06-23; 责任编辑: 周健。

作者简介: 宋明春, 男, 1963 年生。博士, 研究员, 地质矿产勘查专业。Email: mingchuns@163.com。

引用本文: 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. 地质学报, 94(9): 2606~2625. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020237.

Song Mingchun, Yu Xishun, Song Yingxin, Xiao Bingjian, Zhou Dengshi, Gao Cunshan, Feng Aiping. 2020. Types, sources, and regional crust-mantle evolution background of diamonds in the western Shandong Province. Acta Geologica Sinica, 94(9): 2606~2625.

系、石炭系、侏罗系、古近系和新近系 5 个金刚石储集层。前人对鲁西金刚石矿床及金伯利岩、金刚石等进行了较多研究(Luo Shengxuan et al., 1999; Yi Zuowei et al., 2005; Kong Qingyou et al., 2006; Zhang Hongfu et al., 2007; Yang Yueheng et al., 2009; 周登诗, 2015; Zhao Xiufang et al., 2016; Zhang Yong et al., 2016; Wang Yufeng et al., 2019), 但关于金刚石的壳幔演化背景则很少涉及。实际上, 鲁西金刚石分布于古生代以来各构造层的底部, 蕴含了鲁西地区地壳和地幔演化的重要信息。因此, 全面分析鲁西金刚石的类型、源区和时空分布, 既有利于指导进一步找矿, 也有助于深化认识鲁西乃至华北克拉通的地质构造发展过程。

1 区域地质背景

鲁西地块位于华北克拉通东部, 其东以郯庐断裂与胶北地块和苏鲁超高压变质带相邻, 其北为中新世渤海湾盆地, 其西为新生代济宁坳陷。该区主要由早前寒武纪结晶基底、新元古代—古生代沉积盖层和中新世陆相盆地沉积组成, 少量中生代侵入岩体(图 1)。早前寒武纪结晶基底岩系主要为新太古代 TTG 质花岗岩类和花岗岩-闪长岩类, 零星分布泰山岩群和沂水岩群变质地层, 有较多镁铁质-超镁铁质岩浆岩(如泰山岩群中的科马提岩、侵入岩中的万山庄组合和南涝坡组合)。新元古代—古生代沉积盖层中, 青白口纪—震旦纪土门群为滨浅海相碎屑岩夹碳酸盐建造; 寒武纪—奥陶纪的长清群、九龙群和马家沟群总体以浅海台地相及潮坪、瀉湖相碳酸盐岩为主, 早—中寒武世有较多潮坪泥砂质沉积及少量滨海砂砾岩沉积, 晚寒武世出现较多风暴沉积; 石炭纪—二叠纪月门沟群和石盒子群为海陆交互相-陆相沉积, 上石炭统为准碳酸盐台地和三角洲-潮坪瀉湖相的暗色砂泥岩、灰岩和煤层, 早二叠世早期沉积了三角洲相砂、泥岩建造夹煤层, 早二叠世中晚期为河湖相碎屑岩沉积, 局部夹煤线。中新世陆相盆地沉积中, 侏罗纪淄博群和早白垩世莱阳群为河湖相碎屑沉积, 早白垩世青山群属陆相火山-沉积建造, 晚白垩世王氏群主要为河流相砂岩、砾岩, 晚白垩世—古近纪官庄群为含膏盐的山麓-河湖相碎屑岩, 新近纪白彦组为古生代灰岩裂隙和溶洞内的洞穴堆积, 第四系是分布于现代沟谷中的松散沉积物, 主要是残坡积、冲积物。中生代侵入岩主要为辉长岩、闪长岩类, 少量花岗岩, 岩体规模

较小, 多为浅成岩体(宋明春等, 2003, 2009)。

鲁西地区的构造格局总体显示受中生代以来构造运动和郯庐断裂影响的特征, 包括脆性断裂、基底韧性剪切带、褶皱枢纽在内的构造线均呈 NW 向展布, 与郯庐断裂东侧鲁东地区的 NE 向构造线构成围绕郯庐断裂的扇状格架, 鲁西地区构造线走向在接近郯庐断裂附近发生偏转, 形成牵引“入”字形弧状构造及牵引帚状构造。鲁西地区的中生代盆地呈现 NW 向狭长分布特点, 盆地地层北侧与早前寒武基底岩系之间呈断层接触, 南侧与古生代地层不整合接触, 为北断南超箕状断陷盆地(Li Linhua et al., 2009)。

2 金刚石矿床类型和分布

鲁西地区具有工业价值的金刚石矿床有两种类型, 其一是产于第四纪河流相碎屑建造中的金刚石砂矿床, 其二为奥陶纪金伯利岩建造中的原生金刚石矿床。另外, 近年发现的产于钾镁煌斑岩中的金刚石原生矿, 虽然目前尚不具备工业价值, 但具有进一步勘查的价值。

2.1 金刚石砂矿

2.1.1 矿区位置和地形地貌

已评价的有工业价值的金刚石砂矿床均分布于鲁西地块东南边缘靠近郯庐断裂的郯城断陷盆地中, 位于临沂市郯城县北部的李庄至小埠岭一带。含矿区域位于沂河东侧。区域东部 NNE 延长的马岭山-七级山构造剥蚀残丘纵贯南北, 构成区内二大河流——沂河与沭河的分水岭(图 2), 二条河流分别沿郯庐断裂带西侧的沂水-汤头断裂和东侧的安丘-莒县断裂分布, 金刚石矿分布区位于二条断裂夹持的断陷盆地中; 区域中部梅埠—南泉一带为沂河 II 级阶地, 西部李庄—郯城一带为沂河 I 级阶地、河漫滩和河床。三类地貌区标高分别为 124~184m、70~85m 和 55~60m。

构造剥蚀残丘区主要由晚白垩世王氏群砂岩、砾岩组成, 丘顶及斜坡的低洼部位, 可见残存的河床相砾石层, 其中含有金刚石。沂河 II 级阶地大部分被中更新世于泉组褐色砾石层及残坡积含砾砂层覆盖, 低洼处零星分布全新世早期黑土湖组砂质黏土层, 底部基岩自西向东依次为莱阳群砂岩、砂砾岩夹页岩, 青山群安山质火山岩和王氏群砂岩、页岩, 该地貌区为金刚石矿的主要赋存地段。沂河 I 级阶地平原区被临沂组黏土质砂层覆盖, 其下主要为寒武纪—奥陶纪灰岩夹白云岩, 局部有青山群安山岩和

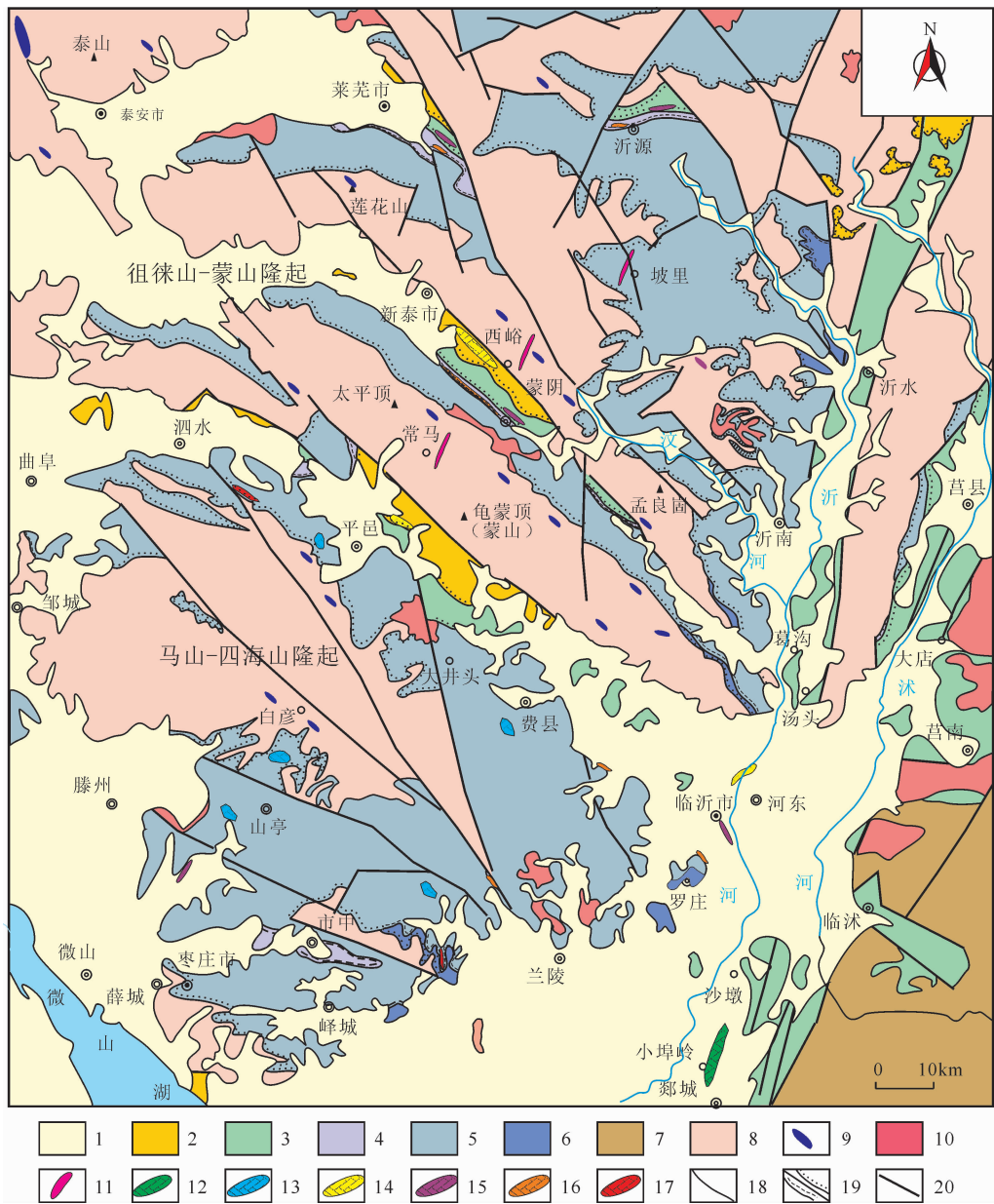


图 1 鲁西地区区域地质及金刚石产出位置图

Fig. 1 Sketch map of Luxi regional geology and diamond production location

1—第四系;2—古近系;3—中生界;4—上古生界;5—下古生界;6—青白口系—震旦系;7—苏鲁超高压变质带;8—早前寒武纪结晶基底;9—早前寒武纪镁铁质-超镁铁质岩;10—中生代侵入岩;11—金伯利岩;12—小埠岭组 and 于泉组中金刚石储集区;13—白彦组中金刚石储集区;14—官庄群中金刚石储集区;15—三台组中金刚石储集区;16—本溪组中金刚石储集区;17—李官组中金刚石储集区;18—地质界线;19—角度不整合地质界限/平行不整合地质界限;20—断裂

1—Quaternary; 2—Paleogene; 3—Mesozoic; 4—Upper Paleozoic; 5—Lower Paleozoic; 6—Qingbaikou-Sinian; 7—Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt; 8—Early Precambrian crystalline basement; 9—Early Precambrian mafic-ultramafic rocks; 10—Mesozoic intrusion; 11—kimberlite; 12—diamond reservoir area in Xiaobuling and Yuquan Formation; 13—diamond reservoir area in Baiyan Formation; 14—diamond reservoir area in Guanzhuang Formation; 15—diamond reservoir area in Santai Formation; 16—diamond reservoir area in Benxi Formation; 17—diamond reservoir area in Liguan Formation; 18—geological boundary; 19—angular unconformity geological boundary/ parallel unconformity geological boundary; 20—fracture

火山碎屑岩。

2.1.2 第四纪地层

(1)早更新世中期地层。包括小埠岭组和于泉

组,为区内金刚石砂矿的赋矿地层。断续出露于马岭山和七级山以西至沂河以东的沂河 II 级阶地,在郯城以南地区被更新世晚期和全新世地层覆盖,在

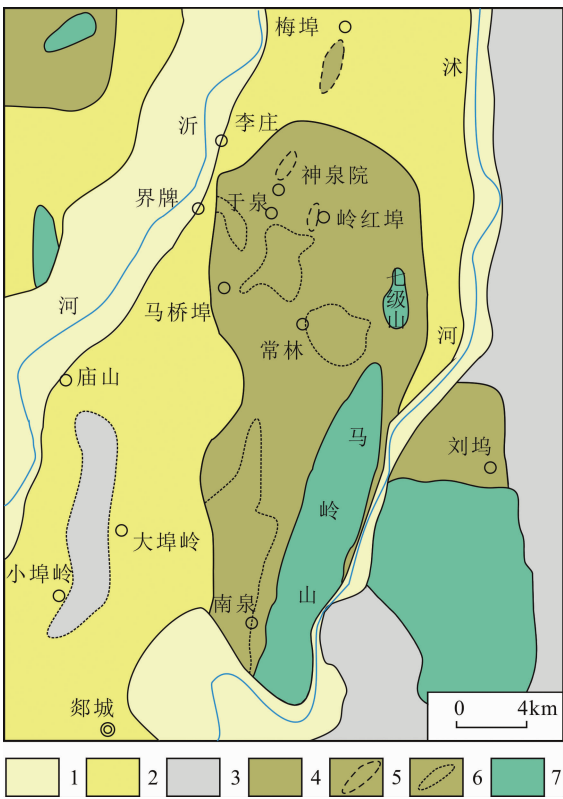


图 2 郯城金刚石砂矿产区地质和地貌图
Fig. 2 Geological and geomorphic map of alluvial diamond in Tancheng area

1—河漫滩和河床;2—I 级阶地平原;3—I 级阶地剥蚀堆积准平原;
4—II 级阶地;5—II 级阶地残丘;6—II 级阶地洼地;7—构造剥蚀
残丘

1—Flood plain and riverbed; 2—first terrace plain; 3—first terrace
denudation accumulation penplain; 4—second terrace; 5—second
terrace monadnock; 6—second terrace depression; 7—structural
denudation monadnock

马岭山 94 高地和梅埠附近也有零星出露。小埠岭组直接覆盖于基岩侵蚀面之上,为灰白、灰绿色含黏土砂质砾石层,局部夹砂和砂质黏土透镜体。于泉组为棕红色或黄褐色砾石层,有的覆于小埠岭组上,有的直接盖在基岩面上,很多地方仅散布该组的砾石碎屑,而无连续的堆积物,是区内工业金刚石砂矿的赋矿层位。于泉组中砾石主要为次圆状—圆状的脉石英、石英岩或石英砂岩,砾石大小混杂、无层理,出露地表的砾石多呈黄褐色,被称为“黄皮砾石”,部分被长期埋藏的砾石为“白皮砾石”。

(2)早更新世晚期地层。包括大埠组 and 山前组,为金刚石砂矿的上覆堆积物。大埠组为 I 级阶地下部的碎屑堆积物,由下部的灰黄色砂砾层和上部的灰黄—黄色砂质黏土、黏土质砂层组成,常含钙质结核和铁锰球。山前组为残坡积的淡棕色、褐黄色砂

质黏土层,分布于山前坡麓地带和沟谷两侧。
(3)全更新世地层。包括黑土湖组、临沂组和沂河组。黑土湖组分布于 I 级阶地准平原的低洼处,由沼泽化形成的灰黑色、褐黑色砂质黏土层组成。临沂组沿沂河两岸的河漫滩、I 级阶地分布,由灰黄色黏土质粉砂、含黏土粉细砂、含砾中细砂组成,具微细水平层理、斜层理。沂河组为现代河床和低河漫滩堆积物,岩性为黄白色砂砾层。

2.1.3 金刚石砂矿床特征

郯城地区以出土大颗粒金刚石而闻名,共出土>90 克拉的特大钻石 5 颗(表 1),20~90 克拉大钻石 150 颗,矿山累计开发动用金刚石储量 80521 克拉。已出土的著名钻石如常林钻石、金鸡钻石,1985 年出土的 338.6 克拉临沂之星钻石是我国已知最大的钻石。

表 1 郯城地区出土特大钻石统计表
Table 1 Statistical table of extremely large diamonds unearthed in Tancheng area

名称	出土时间	产地	重量(ct)	备注
金鸡钻石	1937 年秋	郯城莫疃	218.25(?)	被日本掠去
常林钻石	1977.12.21	临沭常林	158.786	存中国人民银行
陈埠三号钻石	1982.8.15	郯城陈埠	124.27	
陈埠四号钻石	1982.8	郯城陈埠	96.94	
陈埠五号钻石	1983.5	郯城陈埠	92.86	
临沂之星	1985	郯城大塘	338.6	存平邑天宇博物馆

金刚石赋存于沂河 II 级阶地的小埠岭组 and 于泉组中。其中,小埠岭组普遍含金刚石,但品位较低,一般 0.49~1.9 mg/cm³,个别地段可达 3~4 mg/cm³,未圈出工业矿体;于泉组及其坡积物为赋存金刚石矿床的层位,矿床主要分布于阶地残丘顶部及其边缘地带。于泉组中的砾石层、砂砾层或砂质砾石层中金刚石最富集,常形成富矿层,含黏土砂砾层次之,含砾黏土层含矿较贫,而砂层、黏土层一般不含矿。含矿的黄皮砾石层中,往往石英质砾石含量越多,金刚石越富。矿层厚度 0.2~0.3m,个别厚达 1.79m,一般品位 3~4.6 mg/cm³,个别达 15.1 mg/cm³。已勘查的金刚石砂矿区由北向南分别为于泉、陈家埠、邵家湖、柳沟和小埠岭矿区(表 2),具有工业价值的矿体集中于于泉和陈家埠 2 个矿区。根据地貌特征和成因将矿床分为 II 级阶地残丘砂矿、坳谷洼地砂矿和小河砂矿 3 种类型。矿层中金刚石品位变化较大,金刚石晶型多为菱形十二面体,颜色以无色透明为主,80%以上颗粒的粒度为—4+2mm 级(≥2~≤4mm),金刚石平均粒重 64~78mg。金刚石品级较高,装饰品级>25%,工业级 50%,碎粒级 25%±。

2.2 金伯利岩型金刚石原生矿

2.2.1 金伯利岩分布及产状

鲁西地区已发现常马庄、西峪和坡里 3 个金伯利岩带(图 3),均位于鲁西地块东部蒙阴县境内,东距郯庐断裂 45~60km。岩带总体走向 55°左右,宽 15km,共由 10 个岩管、47 条岩脉和 1 个岩床组成,3 个岩带由南向北逐渐向东偏移。

(1)常马庄岩带:位于蒙阴县城西南约 13km 的常马庄以西,由 8 组岩脉和 2 个岩管组成。总走向 NW345°,长约 14km,宽 2.5km,各岩脉之间呈右列

式排列,走向 15°~35°,与岩带总体走向成 30°~50°的夹角。岩带中部岩体比较集中,在王村有 2 个岩管产出,岩脉向北变稀,向南只有 1 条。该岩带的岩性以斑状金伯利岩为主,岩石中镁铝榴石含量较多,因此大多岩体中都有斑状镁铝榴石金伯利岩。细粒金伯利岩一般构成岩脉的边缘,金伯利角砾岩产在岩管和岩脉的膨大部位。蒙阴地区金伯利岩的主要类型列于表 3。在金伯利岩与围岩接触带处一般有厚度不等的蛇纹石化碎裂岩,其中的金刚石含量大部分达到工业品位要求,构成了金刚石矿体。

表 2 郯城地区金刚石砂矿床特征

Table 2 Characteristics of alluvial diamond deposit in Tancheng area

矿区名称	矿体名称	矿体平面 形态	矿体规模				赋矿岩性	品位 (mg/cm ³)
			长(m)	宽(m)	厚(m)	面积(km ²)		
于泉	神泉院	不规则多边形	1000	150~500	0.5~0.6	0.46	含砾碎石、含黏土中粗砂	3.818
	于泉		1500	600~1000	0.68	1.10	含碎石砾石层、含碎石砾石砂层	
	莫疃		1500	800	0.46	0.98	含砾砂层、含碎石砾质砂层	
	岭红埠	不规则长条状	4000	120~1000	0.75	2.20	含碎石砾质砂层、含砾黏土砂层、砾石层	4.509
陈家埠	陈家埠	不规则椭圆形	2500	1750	0.69	3.22	砂砾层、含砾碎石质砂层、含砾黏土层	
	陈埠小河	不规则长条状	2200	400~960	0.86	1.25	砂层、含砾黏土层、砾质砂层	
邵家湖	邵家湖		1000	320	0.51	0.22	砾石层、黏土砂层	4.585
柳沟	柳沟	不规则椭圆形			0.45	0.21	砾石层、黏土砂层	4.1
小埠岭	小埠岭				0.56	0.23	砂质砾石层、含砾黏土砂层	3.0

表 3 蒙阴地区金伯利岩主要类型及特征

Table 3 The main types and characteristics of kimberlite in Mengyin area

岩石类型		颜色	主要组分(%)	结构构造	产出位置	其他
粗晶金伯利岩	镁铝榴石粗晶金伯利岩	暗绿、灰绿色,风化后呈黄绿色、黄褐色	粗晶橄榄石平均 43.58,最高达 61.4;粗晶金云母一般<5,肉眼可见镁铝榴石	粗晶结构,块状构造	岩管	常见深源和同源捕虏体
	金云母粗晶金伯利岩		粗晶橄榄石 30~40,粗晶金云母一般 10~40		岩管、岩脉	
	分凝粗晶金伯利岩		球粒 5~30	分凝结构,块状构造	岩管	
细晶金伯利岩	金云母细晶金伯利岩	灰绿色、暗灰绿色	显微斑晶橄榄石一般 5~20,金云母一般 10~30	显微斑状结构,块状构造	岩管或岩脉的边部	
粗晶金伯利角砾岩		灰—灰绿色	碎屑 15~20,粗晶橄榄石 10~40,粗晶金云母<5	碎屑结构,角砾状构造	岩管或岩脉的膨大部位	碎屑物有同源碎屑和异源碎屑
凝灰质金伯利岩		灰绿色	碎屑成分以围岩为主	碎屑结构,凝灰结构,斑杂构造	岩管	

(2)西峪岩带:位于蒙阴城以北约 12km 的西峪村附近,按岩脉展布方向可分为 NNE 向岩带和 NW 向岩带两部分。NNE 向岩带位于新泰-垛庄断裂主断面的东北侧,长 12km,宽 0.5~1km,由 10 组岩脉和 8 个岩管组成。NW 向岩带位于新泰-垛庄断裂主断面的西南侧,由 5 个岩体组成,以岩脉为主。岩脉受构造控制,在破碎带及密集节理带中断续分布,呈雁列式或斜列式分布。每条岩脉都由若干条厚薄不等、长短不一的小脉体组成,岩脉边界一般清楚光滑。岩脉主要岩性是金云母斑状金伯利

岩,北端岩脉褐铁矿化和硅化较强,而 NW 向岩脉岩性为碳酸盐化斑状金伯利岩。岩管由地表向深部其直径有逐渐缩小的趋势。岩管的岩性以斑状金云母金伯利岩为主,还有金伯利角砾岩、斑状镁铝榴石金伯利岩、细粒金伯利岩、碳酸盐化金伯利岩、斑状含岩球金伯利岩等。

(3)坡里岩带:位于蒙阴县城东北约 30km 岱崮镇的野店—坡里—金星头一带,由 25 组岩脉组成,未发现岩管,总走向北东 35°~40°左右,长约 18km,宽约 0.6km。岩脉走向基本和岩带一致。多

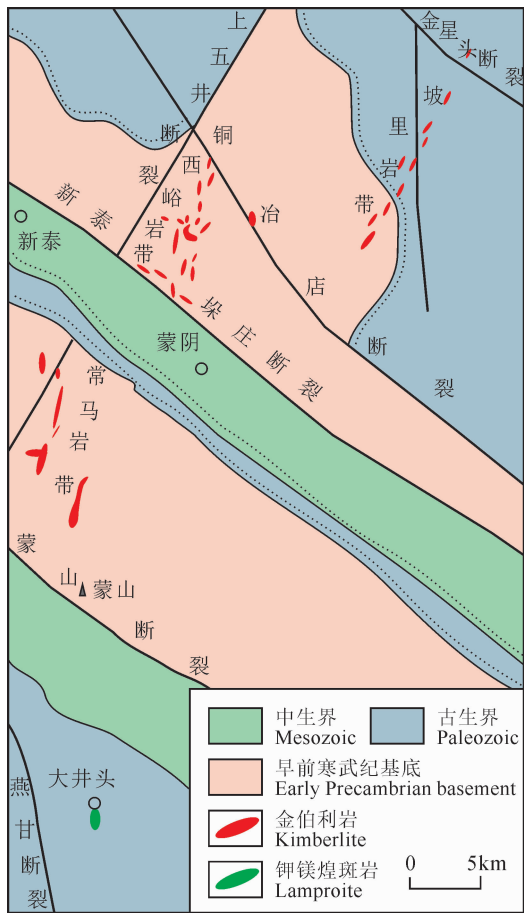


图 3 蒙阴地区地质图和金伯利岩分布图
Fig. 3 Geological and distribution map of kimberlite in Mengyin area

呈断续或侧列式排列。岩脉受构造控制,主要是NE35°~45°的压扭性断裂。主要岩性为斑状金云母金伯利岩,含金刚石极少或不含。

2.2.2 金伯利岩的含矿性

蒙阴地区的 58 个岩体中,含矿岩体 43 个,占发现岩体总数的 74.14%;达到工业品位的岩体 25 个,占发现岩体总数的 43.10%。不同岩带的金伯利岩体含矿性不同,常马庄岩带含矿性最好,发现岩体 9 个,均含矿,8 个达到工业品位;西峪岩带含矿性次之,金刚石含量中到贫,发现岩体 24 个,均含矿,17 个达到工业品位;坡里岩带含矿性较差,发现岩体 25 个,10 个岩体含矿,均达不到工业品位。

3 个金伯利岩带的含矿性,具有南富北贫、中间富两边贫的变化规律。北部的坡里岩带中金刚石贫,南部的常马庄岩带中金刚石最富,中部的西峪岩带金刚石含量居两者之间。同一金伯利岩带中存在南富北贫的现象,坡里金伯利岩带南段比北段富,西峪岩带南端的红旗 3 号脉金刚石平均品位是北端红

旗 16 号金刚石平均品位的 5.7 倍,常马庄岩带南端的红旗 27 号脉金刚石的平均品位是北端埠洼岩脉金刚石品位的 45 倍。

不同产状的金伯利岩体含矿性不同,10 个金伯利岩管的金刚石含量均在工业品位之上,47 个金伯利岩脉中只有 14 个达到工业品位,即岩管的含矿性好于岩脉。

金伯利岩的含矿性在垂向上有一定的变化规律,如红旗 6 号、红旗 7 号、红旗 8 号、红旗 18 号、红旗 22 号和红旗 32 号金伯利岩管,它们在地表较贫,到垂深 100m 金刚石品位有变富的趋势;而到垂深 200~300m 处,金刚石品位又出现变贫的现象,在垂深 300m 以下,金刚石品位又逐渐升高。金刚石指示矿物的含量与金刚石含量有直接关系,金伯利岩中含镁铝榴石、铬铁矿、透辉石等指示矿物越多金刚石的品位越富,金伯利岩中深源包体越多金刚石的品位越高,金伯利岩中金云母的含量越高金刚石的品位越低。

2.2.3 金刚石矿体

蒙阴地区的金伯利岩体达到工业品位的共有 25 个,前人对主要矿体均已命名,具有一定规模的矿体如:常马庄岩带中的胜利 I 号、胜利 II 号、红旗 1 号、红旗 2 号、红旗 14 号、红旗 27 号、红旗 30 号、胜利 VI 号、胜利 III 号;西峪岩带中的红旗 23 号、红旗 6 号、红旗 7 号、红旗 8 号、红旗 18、红旗 22 号、红旗 28 号、红旗 32 号、红旗 33 号。其中胜利 I 号和红旗 1 号矿体是已开采的规模最大的矿体,以胜利 I 号矿体为例其特征如下:

胜利 I 号岩管在地表及浅部由大、小 2 个管状矿体组成,二者地表最近距离 23m。胜利 I 号大岩管平面呈椭圆形,长轴走向 300°左右,长轴长约 98m,短轴长 50m,地表平面面积 3987.5m²。矿体向南西倾斜,总体倾角为 85°。矿体垂直方向控制标高为+260~-720m,边界清晰,界面陡立,向深部呈近直立的上粗下细漏斗状。大岩管和小岩管在标高-40m 合为一体,倾向南西,倾角约 81°;在标高-190m 至-540m,岩管继续向南西偏移,在标高-340m 处发现隐伏岩体,矿体断面南边界距地表南边界向南移 38m,北边界向南移 74m。在-340~-440m,矿体近直立,变化不大,在垂深 700m(标高-440m)至垂深 800m(标高-540m),矿体明显南西偏移缩小。从标高-290~-560m 岩管有明显变化,岩管(矿体)厚度变小,倾角变缓,出现明显的分支,夹石变厚,岩性类型由复杂变单一。总之,胜

利 I 号岩管的直径自上部—中部—深部呈缓慢缩减,其产状自地表至-640m 有变缓的趋势。

矿体围岩为新太古代片麻状细粒含角闪黑云石英闪长岩。矿石类型主要为镁铝榴石粗晶(斑状)金伯利岩和金伯利角砾岩,少量细晶金伯利岩、蛇纹石化碎裂岩和含金伯利岩细脉。金刚石品位变化较大,大管斑状金伯利岩一般 $100\sim 800\text{mg}/\text{m}^3$,最高可达 $1909\text{mg}/\text{m}^3$,围岩角砾金伯利岩一般 $100\sim 600\text{mg}/\text{m}^3$,最高达 $626\text{mg}/\text{m}^3$,矿体品位一般在 $200\sim 500\text{mg}/\text{m}^3$, -40m 标高以上矿体平均品位 $390.080\text{mg}/\text{m}^3$;小管状金伯利岩一般 $200\sim 2000\text{mg}/\text{m}^3$,最高达 $3155\text{mg}/\text{m}^3$,金伯利岩化角砾岩一般在 $32\text{mg}/\text{m}^3$ 左右,个别样品 $300\text{mg}/\text{m}^3$,矿体品位一般在 $600\sim 1200\text{mg}/\text{m}^3$,平均品位 $963.342\text{mg}/\text{m}^3$ 。该岩管是我国单位体积金刚石含量最高、单个岩管金刚石含量最富的矿体。

胜利 I 号岩管金刚石颗粒大小差异很大,重量多小于 2mg ,其中 $-4+1\text{mm}$ 级金刚石约占 70% , $>4\text{mm}$ 约占 10% , $<1\text{mm}$ 约占 20% 。金刚石晶体形态以菱形十二面体为主;其次为八面体、八面体与菱形十二面体的聚形;较少见立方体、四六面体、六八面体,六八面体、八面体与菱形十二面体的聚形,立方体与菱形十二面体的聚形及八面体、立方体与菱形十二面体的聚形。在 I 号岩管深部(深 $841.30\sim 850.0\text{m}$)选获的金刚石,为淡黄色,菱形十二面体或立方体与菱面体聚型,金刚光泽,高硬度,粒径 $0.4\sim 1\text{mm}$,重量 $2.46\sim 6.21\text{mg}$ 。晶面为外凸的球形曲面,晶棱外凸的弧形曲线。晶体表面具有不规则的蛇穴状凹陷和麻点状蚀象,见有石墨包体(图 4)。金刚石的颜色大部分为淡黄色,约占 52.75% ,其次为无色和浅黄色,分别约占 36.28% 、 6.14% ,少量浅灰色、褐色、浅蓝绿色、乳白色和玫瑰色。金刚石品级以工业级为主,宝石级约占 20% ,大颗粒宝石级金刚石多产自小岩管的南部,其中蒙山 1 号、蒙山 2 号、蒙山 3 号、蒙山 4 号、蒙山 5 号金刚石,分别重达 119.01ct 、 65.57ct 、 67.03ct 、 45.74ct 、 101.4695ct 。

2.3 钾镁煌斑岩型金刚石原生矿

2.3.1 矿区位置和地质概况

钾镁煌斑岩是鲁西地区近年来新发现的中生代金刚石原生矿赋矿地质体(Wang Yufeng et al., 2019; Zhong Weigui et al., 2003),另外在江苏徐州市北部也发现中生代含金刚石的橄榄玄武玢岩和金伯利岩管(Huang Youbo et al., 2019; Zhou

Qizhong et al., 2019),虽然这些含金刚石的岩体均未达到矿体的标准,但我们今后找矿提供了新的重要线索。

鲁西含金刚石的钾镁煌斑岩位于蒙阴常马金伯利岩带南约 30km 的费县朱田镇大井头村南(图 3)。钾镁煌斑岩出露区域的主要地质组成为寒武-奥陶纪的灰岩、白云岩及泥页岩,厚度约 630m ,下伏新太古代泰山岩群和 TTG 质花岗岩。矿区附近零星分布钾质超基性岩体。区域断裂构造较发育,包括北北西、北西和北北东走向三组,其中位于矿区西侧的北北西向燕甘断裂是区域性主干断裂,大井头岩管分布于北北东向断裂和北西向断裂的交汇部位附近。

2.3.2 含矿岩体特征

大井头岩体地表形态呈北东向展开的扇形,南北向较长,约 105m ,东西向稍短,约 65m ,出露面积 5761m^2 。经钻探工程验证,大井头岩体为南南西向倾斜的岩管,倾向 202° ,倾角 81° 。目前控制深度为 580m ,自地表向下,岩管直径逐渐变小,岩石遭受风化蚀变程度减弱(Wang Yufeng et al., 2019)。

大井头岩管的近地表岩性主要为强风化蚀变的钾镁煌斑岩、凝灰质角砾岩、层状火山碎屑岩及火山集块岩,岩石具有煌斑结构、碎屑结构,角砾状、层状构造,碳酸盐化、绢云母化、蒙脱石化、绿泥石化、褐铁矿化等蚀变较为发育。据钻探工程揭露,岩管深部逐渐过渡为较新鲜的钾镁煌斑岩,岩石具有钾镁煌斑岩所特有的灰色—绿灰色斑点状外貌(Wang Yufeng et al., 2019)。

岩相学观察,岩石具变余斑状结构和隐晶状结构,原生矿物均已遭受蚀变,镜下仅可见碱性长石和透辉石等矿物晶体假象,偶见细小短柱状磷灰石、尘点状或浸染状的铁质矿物。岩石全部由蚀变矿物组成,其中碳酸盐约占 70% ,残余长英质矿物约占 12% ,绢云母约占 8% ,黏土矿物约占 3% ,另外含约 7% 的不透明矿物(Wang Yufeng et al., 2019)。碳酸盐矿物呈微晶状、细晶状或稠密浸染状分布,而绢云母呈微鳞片状填充于碳酸盐晶隙中。斑晶多被碳酸盐交代,个别被绢云母交代,仅保留其矿物假象。基质也已发生极强的绢云母化、绿泥石化和碳酸盐化。

2.3.3 金刚石特征

对采自探槽、钻孔和地表浅坑等的样品进行选矿,累计选获金刚石 12 颗。其中 3 颗选自钻孔岩心中,9 颗选自近地表的基岩选矿大样中。金刚石粒

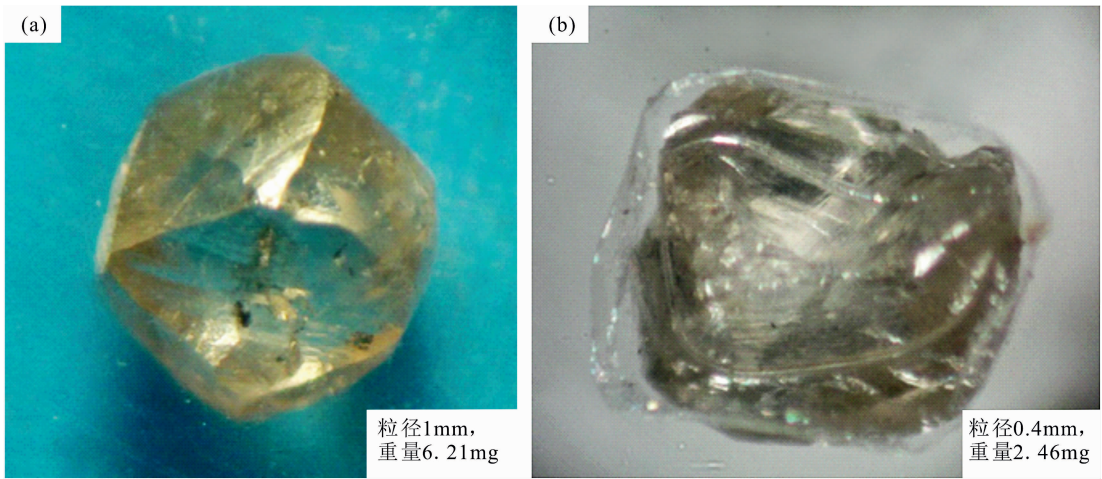


图 4 胜利 I 号岩管深部金刚石特征

Fig. 4 Characteristics of diamond in deep Shengli No. I kimberlitic pipes

(a)—完整晶形的金刚石,晶棱为弧形曲线,含石墨包体(晶体中黑色者);(b)—金刚石晶体表面具有不规则蛇穴状凹陷

(a)—Complete crystal diamond, its crystal edges show arc curve, where in the crystal contains graphite;

(b)—irregularly shaped excavations in the diamond surface

径为 $-0.5+0.1\text{mm}$ 级,浅黄绿色,透明,金刚光泽,晶形均为立方体与八面体的聚型。其中钻孔 16zk01 中选获的 1 颗金刚石,呈浅黄绿色,立方体与八面体的聚型,粒径 0.1mm ,取样位置 $17.70\sim 24.40\text{m}$,金刚石晶面具有天然金刚石所特有的毛玻璃化蚀象(Wang Yufeng et al., 2019)。

3 金刚石储集层及所含金刚石

除了郯城地区的第四系金刚石砂矿外,鲁西地区还有五个不同时代的含金刚石层位。由老到新是:早寒武世李官组、晚石炭世本溪组、晚侏罗世三台组、古近纪官庄群、新近纪白彦组。

3.1 李官组

李官组为鲁西古生代地层的最底部,不整合于早前寒武纪基底或青白口纪—长城纪土门群之上。其分布较局限,只见于枣庄盆地东北缘及平邑、费县、泗水、苍山的局部地区。李官组底部的砾岩层是金刚石储集层,砾岩层规模不大,呈透镜状产出,在枣庄市柯口—上泥河一带,砾岩层断续分布,最大厚度约 8m ,走向长约 200m ,不整合于泰山岩群之上,其底面即早前寒武基底的剥夷面,起伏变化明显,这种砾岩被认为是不整合面之上的底砾岩。李官组砾岩由砾石和泥砂质组成,砾石含量占 70% 以上,砾石成分主要为早前寒武纪基底的 TTG 质花岗岩,砾石大小悬殊、分选很差,砾径一般 $>5\text{cm}$,少量达 $30\sim 40\text{cm}$,砾石磨圆度也较差,呈次棱角—棱角状者较多。

目前仅在枣庄上泥河和泗水疃庄地区出土 4 颗金刚石。上泥河 1 颗— $1+0.5\text{mm}$ 级金刚石,颜色不均匀,表面有很多大小不一、深浅不同的绿色斑点,有的斑点在灯管照射下具有褐色反光。晶体形态为曲面棱形十二面体,晶面上具有沿缝合线对称的锥状丘,有的还密集呈叠瓦状、锥状蚀象。晶体的晶角、锥状丘的顶端浑圆而显钝,缝合线浑圆而显宽。上泥河另 1 颗— $0.5+0.2\text{mm}$ 级金刚石,呈淡绿色,破碎面上有 1 处深绿色斑点,晶体形态为八面体双晶,晶面上有密集的倒三角和六边形凹坑。疃庄 2 颗— $1+0.5\text{mm}$ 级金刚石,呈淡黄色,晶体形态为阶梯状八面体,原始晶面由厚板状角顶分叉的三角形生长层构成,生长阶梯受溶蚀后变圆滑,金刚石晶体内有石墨包体。

李官组砾岩中还含有镁铝榴石、铬尖晶石、铬透辉石等金刚石原生矿指示矿物。其中镁铝榴石含量较多、分布普遍,在枣庄盆地东北缘、平邑、费县、泗水及兰陵等地均有大量出土。

3.2 本溪组

本溪组在鲁西地区 NW 向的断陷盆地边缘地带常有出露,但分布较零星。该组为海陆交互相沉积,不整合覆于奥陶纪地层之上,底部为铁铝层,向上有泥岩、砂岩、砂质灰岩、灰岩等。地层厚度变化较大,东部莒县竹园、昌乐朱刘店等地厚度约 $70\sim 90\text{m}$,向西至蒙阴、新泰一带,厚度减至约 50m ,到西部的肥城一带厚度约 40m ,自东向西厚度呈减薄趋势。地层中含有 4 层砾岩:第 1 层砾岩位于中—晚

奥陶世八陡组灰岩风化剥蚀面上,第2层砾岩位于G层铝土矿之上,第3层砾岩位于草埠沟灰岩之上,第4层砾岩位于徐家庄灰岩之上。金刚石储集于第2、3层砾岩中,在第1和4层砾岩中未选获金刚石。砾岩层一般呈透镜状,规模较小,长度一般为10m至100余米,厚度10cm至3m。由于砾岩层不连续分布,在同一地层剖面上4层砾岩都出现的机会很少,甚至同时见到2层砾岩的情况也不多。

第2层砾岩,在蒙阴邢家庄出露厚度一般为0.3~0.4m,最厚达1m。岩石呈棕褐色,钙质胶结,局部为铁质胶结。砾石含量>30%,其中16mm级砾石含量占砾石总量的21%, $-16+8$ mm级占31%, $-8+4$ mm级26%, $-4+2$ mm级22%。砾石成分以燧石为主,占砾石总量的42%,其中黄色燧石含量略大于黑色燧石;其次为石英岩砾石占22%,脉石英21%,石英砂岩9%,黏土岩4%。另外还发现少量变质岩砾石和岩屑。砾石以圆状、次圆状为主,次棱角和棱角状较少。基质中有大量岩屑,可见到海绿石。

第3层砾岩,在沂南(界湖)东陵的砾岩呈棕褐色,粗碎屑结构。砾石成分以燧石为主,次为石英岩及其它硅质岩。砾径1~2cm,磨圆度及分选性均较好,直径0.5cm以上的砾石多为圆形,0.5cm以下的砾石多为次圆状及次棱角状。岩石中砾石含量>80%,其中黑色燧石砾占砾石总量的40%±。莱芜长尾岭地区该层砾岩中砾石成分为角闪片岩、石英岩、伟晶岩、片麻岩、燧石、石灰岩等,砾石直径2~5mm,砾石呈圆形或卵形。

本溪组中含金刚石较广泛,在莱芜、蒙阴、费县、临沂、苍山等地均有金刚石出土。根据选矿结果统计,储集层平均20余立方米可选获金刚石1颗,富集处平均3~4m³即可选获金刚石。储集层中含少量铬镁铝榴石。

金刚石颜色以浅黄色、绿色者居多,很多晶体带有绿色和褐色斑点,有少量棕黄色、无色晶体。晶体形态以溶蚀边八面体或晶棱呈槽形的八面体为主,其次是曲面菱形十二面体。晶体完整度高,完整晶体含量占52.94%,次生破碎的约5.88%。金刚石质量好,无杂质,包体含量少,无包裹体的颗粒占70.59%。晶体磨损程度高,有47.06%的颗粒受到明显磨损,在搬运过程中受到岩块和砾石的打击,造成金刚石破碎并在边缘产生密集的小裂口。金刚石粒度较大,绝大部分为 $-4+2$ mm级,颗粒平均重量15.26mg,是前第四纪储集层中金刚石颗粒粒度最

大的层位。

3.3 三台组

三台组分布在鲁西各断陷盆地内。主要由砖红色或杂色具交错层理的砂岩、砂砾岩组成,属河流相沉积。在鲁西南部的蒙阴、沂源等盆地中地层具二分性,下部为砂岩段、上部为砾岩段,不整合覆于石炭系之上(Liu Weiming et al., 1995)。在临沂金雀山地区出露的三台组砾岩,新鲜者岩石呈棕褐色,砾石含量50%±,砾石成分以紫红色、黑灰色、白色石英岩、脉石英为主,其次为各种颜色和成分的砂岩。在金雀山砾岩中共发现金刚石、镁铝榴石、铬透辉石、铬铁矿等金刚石和伴生矿物及其他矿物23种。

金刚石储集于三台组砾石层中,含矿较好的地段为临沂金雀山附近及滕州木石一带。金刚石含量较贫,平均25m³可选获1颗金刚石,在临沂金雀山附近及滕州木石一带平均数立方米至十余立方米即可选获1颗。已选获的金刚石中,除1颗 $-2+1$ mm级金刚石外(重量4.10mg),其余均为 $-1+0.5$ mm级。金刚石的颜色以无色为主,其次为淡黄色、浅棕色、浅绿色等,有的金刚石有绿色或褐色斑点。晶体形态有阶梯状八面体、曲面菱形十二面体、八面体与曲面菱形十二面体的异形面、平面八面体以及立方体与八面体的聚形等。砾石晶体完整程度较高,完整晶型占72.22%,次生破碎较少,受磨损的占11.11%。金刚石的包体大部分为石墨,只有1个包体为橄榄石。另外,该组中出土镁铝榴石72颗。

3.4 官庄群

官庄群砾岩发育在鲁西断陷盆地内,不整合于白垩纪地层之上。蒙阴一带的官庄群,厚度300~750m,下部以紫红色砂岩、砾岩为主,上部为一套灰黑、紫红等色泥岩、砂岩夹砾岩、泥灰岩和灰岩。砾岩的砾石成分,下部以石英为主,其次为灰岩、脉石英、安山岩、闪长玢岩、花岗片麻岩等,中部砾石成分以灰岩为主,次为石英岩。平邑一带的官庄群最大厚度1500m,下部以砾岩、砂岩为主,局部为含砾黏土岩,上部主要为泥灰岩。

金刚石赋存于官庄群卞桥组和朱家沟组砾岩中,含金刚石的层位集中分布在蒙阴召子官庄一带,在平邑前南埠崖也有出土。

在蒙阴召子官庄选获金刚石26颗,总重27.1mg,其中 $-2+1$ mm级2颗, $-1+0.5$ mm级9颗, $-1+0.2$ mm级15颗。在平邑前南埠崖选到金刚石1颗,为 $-1+0.5$ mm级。召子官庄金刚石以无色为主,少量淡黄色,晶体类型简单,包括阶梯状

八面体、曲面菱形十二面体、平面八面体、八面体与曲面菱形十二面体的聚形 4 种类型,以前两者为主,晶体完整度较差。晶体特征与蒙阴西峪矿带原生金刚石一致。另外,该组中选获镁铝榴石 900 余颗、铬铁矿 10 颗。

3.5 白彦组

白彦组砾岩分布十分广泛,几乎遍及整个鲁中南地区,凡有早古生代碳酸盐岩分布的地方,都有其存在,充填于碳酸盐岩中的溶蚀沟、槽及洞穴等负地形中,岩性主要为燧石质砾岩。在平邑县石崮庄 406 高地洞穴剖面上,地层厚约 5.7m,下部为含胶磷矿条带和围岩碎块的砂砾岩,中部为砂砾岩、砾岩,含金刚石及鲕化石,顶部为砂砾岩,成分约 80% 为黄褐色燧石,与下伏马家沟群呈角度不整合接触。白彦砾岩的规模较小,延伸长度一般几米至几十米,个别达百余米,宽度多数 1~5m,最宽达 10 余米,出露面积数平方米至数百平方米。

白彦组砾岩呈褐黄、棕黄、灰白色,砾石含量一般为 50%~80%,砂含量多在 5% 以内。砾石成分比较单纯,燧石砾含量最多,可达砾石总量的 90% 以上,其次有少量褐铁矿、灰岩、赤铁矿、石英等,还见有石英岩、石英砂岩、白云岩、页岩、黏土岩等,偶见英云闪长岩、变粒岩、花岗岩、中基性火山岩碎屑。燧石砾石多为褐黄色、棕黄色,部分为乳白色、浊白色、灰白色,少量褐色、猪肝色、灰色、黄色。大多数砾石表层有一层 1mm 厚的褐黄色皮壳,有些砾石表面带有黑色包皮和斑点。砾石成熟度较高,表面极光洁,据 20 个砾岩点统计,砾石的球度在 0.7~0.8 者占 65%,0.6 者占 30%。砾石表面呈蜡质光泽,光洁如漆,砾石表面可见麻坑和蛀穴状坑。砾石大小较均匀,砾径在 16~8mm 者占砾石总量的 10%~40%,8~4mm 者占 40%±,4~2mm 者占 32%~50%。

白彦砾岩虽然分布零散,规模较小,但普遍含有金刚石,且较富,平均每 0.5m³ 可选获 1 颗金刚石。以平邑—泗水地区的砾岩中含金刚石最富,费县—兰陵地区出土的金刚石单颗粒平均重量最大,鲁西北部地区白彦砾岩中未见金刚石。白彦组砾岩中已出土 >0.5mm 的金刚石 3078 颗,其中 -8+4mm 级占 0.03%, -4+2mm 级占 2.89%, -2+1mm 级占 31.06%, -1+0.5mm 级占 66.02%,颗粒平均重量 2.86mg。蒙山断裂以南出土的金刚石,颜色以无色为主,约占总量的 44.09%,其次有深黄、浅绿、浅黄、浅灰等色,绿色金刚石含量平均

10.14%,与蒙阴金刚石原生矿相比(绿色金刚石占比 2.8%),绿色金刚石含量偏高。绿色金刚含量分布不均,在鲁西西部的爷娘庙后山、南部的枣庄地区,绿色金刚石含量仅约 4.5%。金刚石的色斑以浅绿色为主,一般 1 个晶体只有 1 个浅绿色斑点,有几个浅绿色斑点者较少,仅有 2 个晶体表面有褐色色斑。金刚石晶体形态以曲面菱形十二面体和阶梯状八面体为主,其次为八面体与曲面菱形十二面体的聚形、平面八面体,少量立方体。金刚石完整晶体占 29.47%,原生破碎占 3.51%,次生破碎占 67.02%;次生破碎金刚石中受轻微磨损的占 13.68%,具明显磨损特征的占 0.62%,发现少量宽晶棱金刚石(约 1.43%)(Zhao Xiufang et al., 2016)。砾岩中含有少量金刚石指示矿物:镁铝榴石、铬铁矿和钛钾铬石-钛钽铬石。

4 讨论

4.1 不同时代和层位金刚石特征变化

鲁西地区自古生代以来,各个界级年代地层单位的底部均有金刚石储集层形成,包括下古生界底部的李官组、上古生界底部的本溪组、中生界底部的三台组和新生界底部的官庄群,另外还有第四系底部的小埠岭组和于泉组。除第四系储集层中金刚石粒度最大、含量最高,局部(于泉组)富集成矿外,其余储集层中均达不到工业利用的要求。第四纪以前的储集层中,以本溪组中金刚石粒度最大,绝大部分为 -4+2mm 级,颗粒平均重量 15.26mg,其余储集层中金刚石粒度相近,主要为 -1+0.5mm 级(表 4);白彦组中金刚石含量最富,其次为本溪组和三台组,李官组中出土的金刚石数量最少;三台组中完整晶型金刚石占比最高,其次为本溪组,最低为白彦组,而李官组金刚石的熔蚀、磨圆最严重。时代较老的地层中的金刚石颜色较深而不均匀,时代较新的地层中的金刚石颜色较浅而透明,古生代李官组和本溪组中的金刚石主要为偏黄色、绿色,有较多绿色、褐色斑点;中生代三台组中的金刚石以无色为主,有的有绿色或褐色斑点;新生代白彦组、小埠岭组和于泉组主要为无色者,且透明度较高。原生金刚石中,白垩纪钾镁煌斑岩中金刚石的最大粒度仅为早一中奥陶世金伯利岩中主要金刚石粒度的 1/10,且二者金刚石的晶型明显不同(表 4)。

不同层位金刚石特征的差异与其源区、搬运距离和埋藏时间有关。李官组金刚石除了颜色与其他储集层金刚石不同外,其晶体的晶角浑圆而显钝、晶

面上有各种蚀象等特征也明显不同于其他金刚石,说明该组中的金刚石有独特的源区。本溪组金刚石的粒度大,可能与其来源于遭受初期风化剥蚀的金伯利岩管的浅部相有关,金伯利岩管的浅部相由于经历较长距离由深部至浅部的侵位过程,金刚石结晶的时间较长,可以形成较大的颗粒。白彦组中金刚石比较富、完整晶型者少,可能与该组为溶洞中的冲积成因有关,洞穴中水的流速缓慢,经过较长时间搬运,分选充分,沉积物成分成熟度高,砾岩中燧石砾含量高达总量的 90%以上;三台组中完整晶型金刚石占比高,指示其为近源快速堆积的产物,金刚石搬运距离短,其晶型较少被破坏。时代老的地层中金刚石颜色深,可能与地层埋藏时间长、深度大,长期处于还原环境有关。

4.2 金刚石及其储集层的源区

4.2.1 寒武纪储集层中的金刚石

李官组为形成于寒武纪龙王庙期的岩石地层单位,是鲁西古生代最早期的沉积地层,角度不整合于新太古代花岗-绿岩带之上或平行不整合于土门群之上,具有沉积盖层底部底砾岩性质。地层时代明显早于形成于中奥陶世的蒙阴地区金伯利岩的侵位时间,其中的金刚石不可能来源于金伯利岩。在邻近鲁西地区的郯庐断裂带东侧的苏鲁超高压变质带中的榴辉岩中也有金刚石发现的报道(Wang

Laiming et al., 1998),但前人研究认为,该区的超高压变质作用发生于晚三叠世(Liu Fulai et al., 2003),显然也不可能是李官组金刚石的供源。李官组含金刚石的砾岩,砾石成分主要为新太古代 TTG 质花岗岩,砾石大小悬殊、分选很差、磨圆度也较差,说明砾石的物源为不整合面之下的新太古代结晶基底岩系,金刚石很可能来自于结晶基底。

鲁西新太古代结晶基底岩系为花岗-绿岩建造,主要由新太古代 TTG 质花岗岩类组成,零星分布泰山岩群和基性-超基性侵入岩组合,在蒙阴县坦埠镇龙虎寨村和新泰市羊流镇雁翎关村的泰山岩群中发现有中国公认的具有典型鬣刺结构的太古宙科马提岩(Zhang Rongsui et al., 2001; Cheng Suhua et al., 2006),为幔源超基性喷出岩;基性-超基性侵入岩组合主要由变质的辉石橄榄岩、辉石岩和辉长岩组成,为幔源镁铁质-超镁铁质侵入岩,其中在历城桃科岩体和泗水北孙徐辉长岩体中有岩浆熔离型铜镍硫化物(含铂、钯、铍)矿床产出(Sun Tao et al., 2016)。直接来自于地幔的超镁铁质岩有可能含有金刚石,如:目前已经在全球 5 条缝合带的超镁铁质岩中发现了蛇绿岩型金刚石,包括雅鲁藏布江缝合带、班公湖-怒江缝合带、新疆达拉布特蛇绿岩、俄罗斯乌拉尔 Ray-Iz 蛇绿岩、缅甸密支那蛇绿岩等(Yang Jingsui et al., 2014)。由于鲁西地区以往与

表 4 不同时代地质单元金刚石特征一览表

Table 4 The characteristics of diamond in different geological units

含金刚石的地质单元	粒径	颜色	晶型	晶面特征和次生变化
第四纪小埠岭组 和于泉组	80%以上颗粒的粒度为-4+2mm	无色透明为主	多为菱形十二面体	
新近纪白彦组	-2+1mm 级占 31.06%, -1+0.5mm 级占 66.02%	无色为主,约占 44.09%;绿 色含量 10.14%	曲面菱形十二面体和阶梯 状八面体为主	完整晶体占 29.47%,次生 破碎占 67.02%
古近纪官庄群	-1+0.2mm 级为主,其次 是-1+0.5mm 级	无色为主,少量淡黄色	阶梯状八面体和曲面菱形 十二面体为主	晶体完整度较差
晚侏罗世三台组	-1+0.5mm 级为主	以无色为主,有的金刚石有 绿色或褐色斑点	阶梯状八面体、曲面菱形 十二面体等	晶体完整程度较高,完整晶 型占 72.22%,受磨损的 占 11.11%
晚石炭世本溪组	粒度较大,绝大部分为-4 +2mm 级	以浅黄色、绿色者居多,很多 晶体带有绿色和褐色斑点	以溶蚀边八面体或晶棱呈 槽形的八面体为主,其次 是曲面菱形十二面体	晶体完整度高,完整晶体含 量占 52.94%;晶体磨损程 度高,有 47.06%的颗粒受 到明显磨损
早寒武世李官组	-1+0.5mm 级	淡黄色、淡绿色,颜色不均 匀,表面有很多大小不一、深 浅不同的绿色斑点	曲面棱形十二面体、阶梯 状八面体	晶面上有锥状丘、凹坑,叠瓦 状和锥状蚀象,晶体的晶角、 锥状丘的顶端浑圆而显钝
白垩纪钾镁煌 斑岩	-0.5+0.1mm 级	浅黄绿色	立方体与八面体的聚形	毛玻璃化蚀象
早一中奥陶世金 伯利岩	-4mm+1mm 级约占 70%	大部分为淡黄色,约占 52.75%;其次为无色和浅黄 色,分别约占 36.28%、6.14%	菱形十二面体为主,其次 为八面体、八面体与菱形 十二面体的聚形	晶体表面具有不规则的蛇 穴状凹陷和麻点状蚀象

金刚石有关的找矿和研究工作均集中于古生代以来的地质区,太古宙基底区没有开展相应的工作,当然也没有在其中发现金刚石。但从李官组金刚石供源分析,结合世界其他地区已在超镁铁质岩中发现金刚石的事实,我们认为鲁西太古宙结晶基底中的幔源镁铁质-超镁铁质岩浆岩中是可能含有金刚石的。对鲁西寒武纪李官组—朱砂洞组沉积期的岩相古地理分析(宋明春等, 2003)表明,李官组沉积时期海水由东南向北西漫进,在枣庄、苍山、临沂、沂南、昌乐一带大致沿现在的郯庐断裂西侧出现一个呈北北东向展布的狭长海槽,形成无障壁的滨海沉积,沉积物源为其西部的古隆起区,砾岩中的金刚石可能主要来源于有较多超镁铁质岩产出的鲁西的南部区域——马山-四海山古隆起(图 5)。

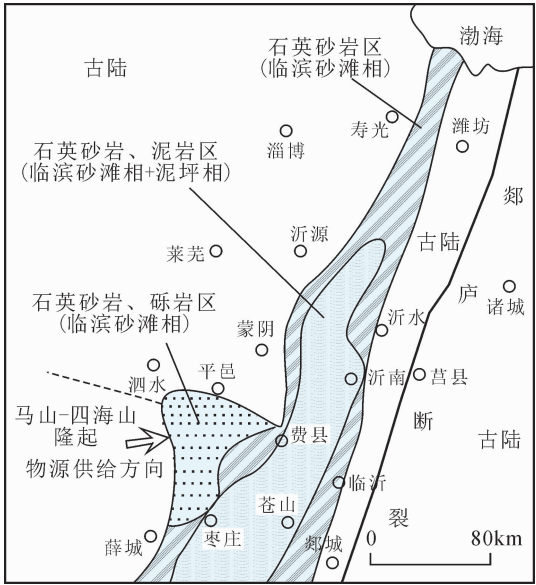


图 5 鲁西寒武纪李官组—朱砂洞组沉积期岩相古地理
Fig. 5 The lithofacies paleogeography of sedimentary period of Cambrian Liguan-Zhushadong Formation in Luxi

原生金刚石有四种类型:金伯利岩型金刚石是宝石级金刚石的主要来源,其粒度可达厘米级,产在克拉通和大陆岩石圈构造背景;超高压变质带中的金刚石颗粒十分细小,由数微米至 $<100\mu\text{m}$,金刚石通常与碳酸岩和地壳成因矿物伴生,其形成的构造背景为板块深俯冲带;蛇绿岩型金刚石产在地幔橄榄岩和铬铁矿中,金刚石的主要特征是粒度普遍较小,多数在 $200\sim 500\mu\text{m}$ 之间,其构造背景为板块缝合带;形成于陨石撞击的金刚石产出和研究均较少,金刚石通常也是微米级,产出在陨石撞击形成的变质岩中(Yang Jingsui et al., 2014)。李官组金刚石的粒度及其可能来源于基底超镁铁质岩等特征,指

示其类似于蛇绿岩型金刚石。对于这种金刚石的进一步研究和溯源,有助于深化鲁西太古宙地幔特征和演化的认识,但不具有金刚石矿找矿意义。

4.2.2 石炭纪以来储集层中的金刚石

本溪组、三台组、官庄群、白彦组和第四系中的金刚石含量比李官组中明显增多,金刚石粒度和晶体特征与之明显不同,说明石炭纪以来储集层中的金刚石比李官组有更丰富和不同的供源。这些地层的共同特点是都覆于蒙阴金伯利岩侵位的最高层位——奥陶纪马家沟组之上,而且金刚石的晶体特征与金伯利岩中的金刚石相似,因此地质工作者普遍认可其供源均为鲁西金伯利岩(Luo Shengxuan et al., 1999)。

本溪组平行不整合覆盖于奥陶纪地层之上,其砾石成分中有大量燧石和少量石英砂岩、黏土岩,这些成分在其下伏的奥陶系和寒武系中均有分布,如在中奥陶世的五阳山组和东黄山组中分别含有燧石结核和燧石砾石(底砾岩),晚寒武世—早奥陶世三山子组和中奥陶世朱砂洞组丁家庄段中均含有燧石结核或条带(宋明春等, 2003),这说明本溪组砾岩大部分来源于下伏的沉积地层,而且砾石搬运距离较长,因此大部分保留了较稳定的石英质砾石,而下伏岩层中最为广泛分布的不稳定的碳酸盐岩则没有保留下来。另外砾石中还有较多石英岩、脉石英和少量变质岩,指示鲁西早前寒武纪基底区也是重要的供源区。在本溪组的底部、砾岩层之下普遍有一层铁铝质岩和铝土岩层,为古风化壳沉积,指示本溪组沉积之前鲁西地区地壳曾强烈抬升遭受了长期风化剥蚀,徂徕山—蒙山一带的早前寒武纪基底地区可能为古隆起,为本溪组沉积提供了物源,位于徂徕山-蒙山隆起东部的蒙阴金伯利岩产区则是本溪组金刚石的供源(图 6),当时的沉积中心在鲁西南部的济宁—滕州—沂南一带。

三台组角度不整合于石炭系或三叠系之上或角度不整合于早前寒武纪结晶基底之上,分布于多个小盆地中,其砾岩的砾石成分较杂,不同的盆地砾石成分不同。如:周村盆地的砾岩为复成分砾岩,砾石由石英质、砂岩、灰岩和花岗质成分组成;南麻盆地和蒙阴盆地的砾岩以石英质为主、少量灰质成分;临沂南盆地以石英岩、脉石英为主,有部分砂岩。鉴于鲁西侏罗纪盆地规模小、分布零散,均为陆相盆地,因此认为砾岩均源于各盆地周边隆起区的古生代沉积地层和早前寒武纪基底岩系。华北地台于古生代末抬升后,经历了三叠纪 4 千余万年的风化剥蚀后

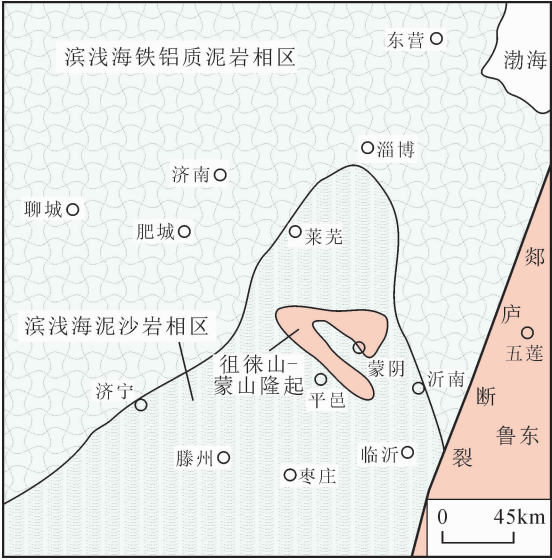


图 6 鲁西晚石炭世本溪组沉积期岩相古地理
Fig. 6 The lithofacies paleogeography of sedimentary period of Late Carboniferous Benxi Formation in Luxi

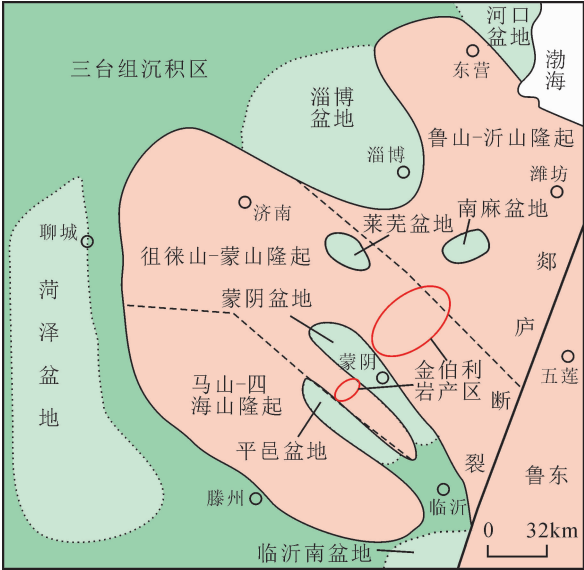


图 7 鲁西侏罗纪三台组沉积期古地理
Fig. 7 The paleogeography of sedimentary period of Jurassic Santai Formation in Luxi

山东的古地形呈现准平原地貌,侏罗纪的主要沉积区在鲁西地块的边缘地带,形成河口、淄博及菏泽三个较大的沉积盆地(图 7),另外有平邑、蒙阴、临沂南、莱芜、南麻等盆地,盆地中三台组砾岩的旋回性结构及砾石成分的复杂性说明此时地壳活动比较频繁。三台组中的金刚石仅见于临沂附近的盆地中,而这个时期西北部的蒙阴一带的金伯利岩区位于盆地附近的古隆起中,无疑证明这一区域为临沂三台组金刚石的供源。

官庄群角度不整合覆于不同层位中生代、古生代地层之上或早前寒武纪结晶基底之上,为规模不大的陆相盆地中的山麓洪积相-河湖相碎屑岩系(Zhang Zengqi et al., 2014),主要沉积盆地有韩泗盆地、平邑盆地、蒙阴盆地、莱芜盆地、南麻盆地等(图 8),砾岩中砾石成分复杂,与各盆地周边的地质体岩性一致,表明沉积物来源于盆地周边。含金刚石的层位主要见于蒙阴盆地西部的蒙阴-新泰一带,鉴于蒙阴盆地以新泰-垛庄断裂为界与其西北部的赋金伯利岩的鲁山-蒙山隆起毗邻,指示金刚石供源为蒙阴金伯利岩。

白彦组分布于平邑盆地以南至苏鲁边界以北区域,主要见于早古生代碳酸盐岩区高中级夷平面上,多分布于现今 80~540m 标高范围。砾岩的砾石成分绝大部分为成熟度高的燧石砾,指示其源区较远或经历较长时间的搬运、沉积过程,该组中的金刚石次生破碎者居多也说明其搬运距离或时间较长。这

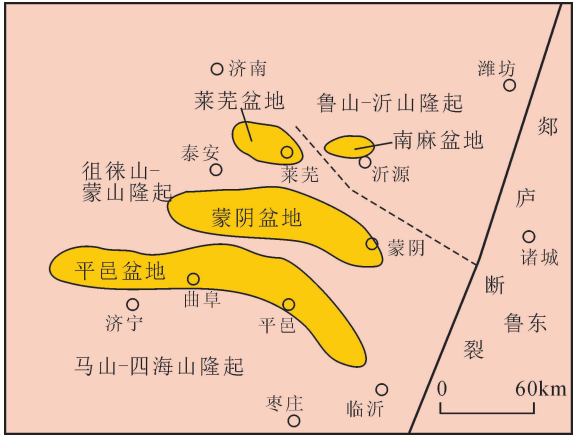


图 8 鲁西古近纪官庄群沉积期古地理
Fig. 8 The paleogeography of sedimentary period of Paleogene Guanzhuang Formation in Luxi

与目前鲁西地区金伯利岩和白彦组的分布位置是相匹配的,金伯利岩分布于鲁西中部的鲁山-蒙山隆起,而白彦组分布于鲁西的南部,二者之间被平邑盆地间隔。根据二者的分布特征推断,当时鲁西地区为中部高、南部低的地势特征,而且南部地势相对平坦,易于接受沉积。现今鲁西地区仍保持与白彦组沉积时相似的地貌特征。

关于郯城地区小埠岭组 and 于泉组中金刚石的源区尚有不同认识,部分地质工作者认为这一区域距离蒙阴金刚石原生矿较远,且金刚石粒度较大,可能在沉积区附近有未知的金刚石供源(Luo Shengxuan et al., 1999)。分析发现,郯城的金刚

石砂矿位于郯庐断裂东侧沿郯庐断裂展布的沂河中下游,沂河发源于沂源县北部的鲁山南麓,河流沿鲁西地块东侧自北向南径流,在沂源县南部源自蒙山和徂徕山蒙阴金伯利岩区的汶河支流并入到沂河主流中(图1),因此认为蒙阴金伯利岩完全可以为小埠岭组 and 于泉组提供金刚石供源。沂河自其发源区至郯城县北部的沙墩镇附近,一直在北高南低、北南高差比较大的山区流淌,山高、水急,河道狭窄,河流以冲刷为主,沉积物较少。沙墩镇以南,沂河逐渐流出鲁西丘陵山区,进入平原区(图1),河道迅速变开阔,地形起伏不大,大量沉积物开始沉积,在丘陵区边缘向平原区过渡的梅埠—郯城一带,地形略有起伏、河道相对变宽且转折较多,河流中的砾石成分和金刚石等重矿物首先沉积,形成了金刚石砂矿床。

4.3 金刚石形成的构造背景和源区地幔性态

虽然鲁西金刚石分布的区域比较广泛,赋矿的层位比较多,沉积的时间跨度也比较长,但其产出的规律性非常强,均形成于不同时代的不整合面上,均源于幔源岩浆岩,说明金刚石的形成与区域构造运动密切相关,蕴含了壳幔演化的重要信息。

4.3.1 早古生代金刚石沉积构造环境和新太古代幔源岩浆活动

早古生代金刚石储集层——寒武纪李官组不整合于前寒武纪地质体之上,这一不整合相当于区域上的蓟县运动,是华北克拉通构造演化的一个重要分划界面,标志着华北克拉通由早前寒武纪的强烈构造岩浆活动时期进入到古生代稳定发展时期,也结束了华北中、新元古代裂陷-沉降非全域、似盖层沉积阶段,开始了早古生代同步沉降、稳定的面式盖层沉积阶段(Duan Jiye et al., 2002)。在鲁西的中西部大多数地区寒武系超覆于结晶基底之上,而在郯庐断裂带及鲁西地块的南部地区,寒武系不整合于新元古代土门群之上,说明自西向东,自北向南剥蚀程度减小。李官组砾岩仅分布于鲁西地块的东南部,向北西方向李官组逐渐消失,不整合面之上直接出现李官组上覆的朱砂洞上灰岩段及丁家庄白云岩段,这种现象反映了沉积初期的地形差异及海陆关系差异,指示鲁西地区的古生代海域最先出现于鲁西东部的郯庐断裂一带,随后海域面积快速向西扩大,造成西部陆相物源相对不足,初始沉积物缺失碎屑沉积。

金刚石出土点分布于鲁西南部邹城—兰陵一带的早前寒武纪结晶基底周边(图1),指示金刚石来

源于这一结晶基底区域。该区域经历早前寒武纪强烈的构造岩浆活动后,于蓟县运动过程中隆起为古陆,这里称之为马山-四海山隆起(图5)。马山-四海山隆起中分布的幔源镁铁质-超镁铁质岩,为李官组金刚石的供源(图9a)。鲁西的超镁铁质岩主要赋存于新太古代泰山岩群、新太古代早期万山庄组合和新太古代晚期南涝坡组合中。泰山岩群底部的超镁铁质岩属于低钛的橄榄质科马提岩,镁铁质岩属于富铁拉斑玄武岩,泰山岩群下部保留完好的具鬣刺构造的科马提岩和广泛的具枕状构造的玄武岩,指示新太古代初鲁西地区处于与地幔柱相关的大洋高原构造环境(Zhang Rongsui et al., 2001; Cheng Suhua et al., 2006; 宋明春等, 2009)。两期基性-超基性侵入岩的地球化学特征指示其形成的构造环境多具岛弧性质,部分早期的超镁铁质侵入岩具洋壳成因的岩石化学特征。对沂水杂岩变基性岩的研究表明,岩石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $+3.8 \pm 0.3$,源自亏损(上)地幔(Shen Qihan et al., 1993)。研究表明,华北陆块自太古宙至古元古代地幔源区的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值稳定在 $+0.5 \sim +4$ 范围,主要集中在 $+2 \sim +3$ (Li Shuguang et al., 1990; 沈其韩等, 1992; Zhang Zongqing et al., 1998),说明这一时段华北上地幔处于弱亏损状态。新太古代是重要的地壳增生期,幔源岩浆岩的地球化学性质指示,这一时期鲁西的地壳演化大致可划分为二个阶段:1)地壳拉张和洋盆形成阶段,新太古代早期地壳拉张减薄(2800~2720Ma),产生洋盆,地幔物质上涌,形成科马提岩和枕状玄武岩,使地壳横向增生;2)洋盆消减及岛弧形成阶段,随着洋盆消减,鲁西逐渐转化为岛弧环境,幔源岩浆活动并引起大规模的(部分)熔融作用,形成幔源超镁铁质侵入岩,并有大量TTG花岗岩类侵位(宋明春等, 2009)。

4.3.2 晚古生代和中生代金刚石沉积构造环境及古生代地幔性态

石炭纪底部本溪组金刚石储集层与下古生界之间的平行不整合,形成于加里东运动末期。该不整合间断的时间较长,缺失上奥陶统、志留系、泥盆系和下石炭统。不整合面上下地层的差异相当大,下部以浅海相灰岩为主,上部以海陆交互相碎屑岩为主。但二者之间的剥蚀面却没有很大的起伏,剥蚀的厚度差异在300 m之内,总体为平行不整合,反映地壳以整体上升为主。石炭纪的初始沉积为具有古风化壳性质的残积相铝土矿和赤铁矿,指示不整合间断期间上升的速度很慢,长时间处于剥蚀夷平

状态,没有形成大的沟谷、山系等。加里东运动在华北克拉通构造演化上具有划时代意义,运动前后沉积-构造古地理发生了重大变化,结束了早古生代同步沉积、弱差异性升降阶段,开始了强差异性升降、向陆相沉积快速转变阶段。

侏罗纪三台组金刚石储集层不整合在太原组、奥陶系、寒武系及前寒武纪结晶基底之上,是印支运动—早燕山运动的产物。这一不整合的强度大,兼并了鲁西局部地区存在的三叠纪底部石千峰群与上古生界之间的海西运动平行不整合界面。从岩性对比上看,不整合面上、下均为陆缘碎屑沉积,差别不太大;但从火山活动、生物特征、环境条件看,不整合上、下有较大的差别。不整合面之上的沉积盆地分布比较零散、范围不大,反映当时的构造分化较明显,沉积环境较封闭、局限。所以该不整合面不仅是后期剥蚀的结果,而主要应是当时构造差异的反映。海西运动和印支运动结束了古生代较开阔、面式的大盆地沉积环境,转化为中生代较封闭、局限的小盆地沉积环境,是华北陆块由古亚洲构造体系向滨太平洋构造体系转化的分界。

石炭纪本溪组 and 侏罗纪三台组中金刚石含量虽然不多,但分布广泛,在鲁西的北部和南部均有见及,而且二者常相伴分布,所含金刚石丰度接近,说明他们的来源一致。从分布位置看,他们均分布于蒙阴金刚石原生矿的外围,这说明蒙阴金刚石原生矿所在的区域于晚古生代至白垩纪时处于强烈隆起区,在隆升过程中金伯利岩遭受剥蚀,为本溪组和三台组提供了金刚石供源(图 9b、c),这里将这一隆起称之为徂徕山-蒙山隆起(图 6、图 7)。由于含金刚石的侏罗纪三台组分布位置向南已达马山-四海山隆起南部的滕州木石一带,因此推测,在侏罗纪时徂徕山-蒙山隆起的高度显著超过马山-四海山隆起(图 9c)。结合前述早古生代金刚石储集层分析,早古生代之前鲁西南部首先隆起,至晚古生代—中生代时鲁西中部的隆起超过了鲁西南部。分布于鲁西北部地区的侏罗系厚度较鲁西南部大,且局部保留有下伏三叠系,也说明当时徂徕山-蒙山隆起的隆起幅度较大。

鲁西金伯利岩侵位的最高层位为早奥陶世马家沟组,未见其与马家沟组之上地层的接触关系。山东省地矿局七队做了大量同位素测年工作,其中黑云母 K-Ar 年龄样、全岩 Rb-Sr 年龄样 13 件,年龄值为 455~554Ma(宋明春等, 2009)。金伯利岩中金云母的 Ar-Ar 年龄为 466.3±0.3Ma 和 464.9±

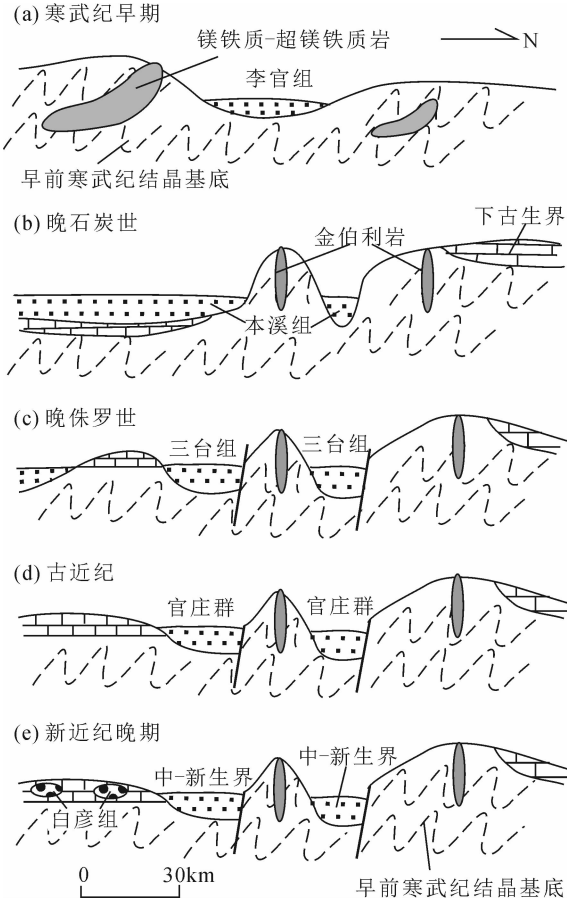


图 9 鲁西地区金刚石储集层形成过程
Fig. 9 Formation process of diamond reservoir stratum in Luxi area

2.3Ma(Zhang Hongfu et al. , 2007), 钙钛矿的 U-Pb 同位素年龄为 465±8Ma(Dobbs et al. , 1994)。因此,认为金伯利岩形成时代为早、中奥陶世之间。金伯利岩形成代的确定为我们正确认识鲁西沉积层中的金刚石供源提供了可靠依据。金伯利岩中有较多纯橄榄岩、橄榄岩和榴辉岩等地幔岩包体,前人研究表明,金伯利岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值变化于 -4.78~+2.76,平均为 -1.1,其中镁铝榴石斑晶的 $\epsilon_{Nd}(t) = -1.21 \sim -4.78$,平均值 -3.01(路风香等, 1996),说明鲁西古生代地幔总体处于弱富集状态,并且存在一个冷而厚(达 200km)、具典型大陆克拉通型地幔的岩石圈(Zhang Qi et al. , 2011)。蒙阴金伯利岩中橄榄岩包体的 Nd 同位素模式年龄有 1.0Ga 和 1.9Ga 两组,可能反映在金伯利岩侵位前的前寒武纪岩石圈深部存在明显的地幔增生改造过程(Zheng Jianping et al. , 2001)。

4.3.3 新生代金刚石沉积构造环境和中新世地幔演化

古近纪官庄群金刚石储集层底部的角度不整合

面穿越青山群、大盛群或王氏群等不同的中生代地层,是一个穿时较长的不整合面。总体上具有自西向东不整合间断逐渐变短的规律,鲁西隆起东部不整合面位于青山群之上,郯庐断裂西侧位于大盛群之上,而郯庐断裂东侧则位于王氏群之上。在鲁西中部和西部该不整合分别与三叠系与侏罗系之间的不整合和莱阳群与青山群之间的不整合兼并,反映发生了较大规模的差异隆起。其中隆起最高的地段位于徂徕山-蒙山隆起周边的沂源鲁村、泰安大汶口和泗水等地,古近纪官庄群直接沉积于上古生界,甚至下古生界之上,缺失中生代沉积,上升幅度可达1000余米。而鲁西的南部地区盆地中一般缺失青山群,官庄群直接覆于莱阳群之上,剥蚀厚度几百米。

古近纪地层和不整合特征指示,古近纪之前徂徕山-蒙山隆起仍然处于强烈隆升状态。从金刚石富集层集中分布于蒙山(太平顶-龟蒙顶)北侧的汶东凹陷和南侧的平邑凹陷中,而在鲁西南部的马山-四海山隆起以南和鲁西北部的莱芜等地凹陷中未选获金刚石分析,马山-四海山隆起和蒙阴以北区域当时的隆起相对比较高,阻挡了金刚石的迁移(图9d)。新近纪以来,鲁西地区中部和北部又有明显抬升,造成白彦组和小埠岭组及于泉组的金刚石富集区均分布于鲁西的南部区域(图9e)。

费县大井头村含金刚石钾镁煌斑岩的发现表明,鲁西中生代幔源岩浆活动也是原生金刚石的来源之一。野外调查显示钾镁煌斑岩形成于白垩纪,在蒙阴坡里测得同期的辉绿岩的锆石 U-Pb 同位素年龄是 117~121Ma(Chu Zhiyuan et al., 2019)。中生代时,岩石圈减薄,深部岩石圈地幔性质发生变化(Zheng Jianping, 2009; Zheng Jianping et al., 2018),古生代稳定的华北克拉通破坏,产生巨量岩浆活动、大规模流体作用和地壳结构受到强烈改造,形成热隆-伸展构造(Song Mingchun et al., 2017, 2018, 2019),在鲁西地区形成了中生代岩浆侵入杂岩、断陷盆地、断裂构造等一系列标志性地质构造现象,以辉长岩和高镁闪长岩为代表的幔源岩浆活动是中生代岩石圈减薄、软流圈上涌直接证据,他们指示了当时地幔的地球化学性状。研究表明,高镁闪长岩岩浆起源于上地幔橄榄岩的部分熔融(Yang Chenghai et al., 2006),而闪长岩中橄榄岩类捕虏体的岩石学和地球化学指示,其来源深度在 40~60km 之间(Xu Wenliang et al., 2003)。这说明由早古生代至晚中生代,鲁西岩石圈厚度由 200km 快

速减薄至 50km 土。华北中生代幔源岩石普遍具显著偏低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,其中鲁西中生代镁铁质岩石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值介于 $-9.2 \sim -21.21$, 峰值变化于 $-12 \sim -18$ (Qiu Jiansheng et al., 2005),早白垩世青山群火山岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -14.2 \sim -16.5$ (Zhang Yongqing et al., 2017),说明地幔于中生代发生强烈富集,这种富集地幔总体具有 EM2 型特征,鲁西的南部出现 EM1 型富集地幔特征(Qiu Jiansheng et al., 2005)。这一时期,在胶东地区发生了广泛的金及有色金属矿成矿作用(Yu Xuefeng et al., 2019; Song Yingxin et al., 2016; Song Mingchun et al., 2017, 2019a)及强烈的岩浆活动,指示这一地区地幔也处于强烈富集状态(Yang Jinhui et al., 2004; Song Mingchun et al., 2019b, 2020)。地幔的富集应与古太平洋板块俯冲引起的岩石圈大规模拆沉有关,古老地壳物质被拆沉而重循环进入地幔,导致地幔成分发生改变形成富集地幔。鲁西新生代玄武岩类岩浆活动指示的地幔特征与中生代明显不同,新生代玄武岩具有类似于大洋玄武岩的地球化学特征,其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 5.81 \sim 6.83$ (Guo Hua et al., 2005),其源区应为亏损的软流圈地幔,这种亏损的软流圈地幔玄武岩以含有蓝宝石为特征(Yu Xiaoyan et al., 2000; Kong Fanmei et al., 2017),而不是金刚石。

上述不同时代的幔源岩石 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 特征说明,华北克拉通的性质自太古宙至显生宙一直在持续变化。在前寒武纪时,地幔处于弱亏损状态;早古生代时,地幔向弱富集状态转变;至中生代时,地幔发生大规模富集;由中生代至新生代,地幔由富集向亏损演变(Fan et al., 2000; Zhou Xinhua et al., 2003),这种变化可能是软流圈上涌对原有岩石圈地幔再改造的结果(Qiu Jiansheng et al., 2005)。具工业价值的金刚石原生矿仅产于早古生代金伯利岩中说明,早古生代弱富集地幔有利于金刚石富集成矿。

5 结论

(1)鲁西金刚石矿床有奥陶纪金伯利岩型原生矿和第四纪砂土型砂矿两种类型,金刚石储集层包括寒武纪李官组、石炭纪本溪组、侏罗纪三台组、古近纪官庄群、新近纪白彦组和第四纪小埠岭组、于泉组等地层单位。

(2)除第四系储集层中金刚石粒度最大、含量最高,局部(于泉组)富集成矿外,其余储集层中的金刚

石相比而言:本溪组中粒度最大,白彦组中含量最富,三台组中完整晶型者占比最高,李官组中的熔蚀、磨圆最严重,由老至新金刚石的颜色由深变浅。这些特征反映出,李官组金刚石具有独特的源区,本溪组金刚石来源于金伯利岩管的浅部相,三台组金刚石为近源快速沉积,白彦组金刚石搬运距离较长。

(3)金刚石储集层均位于鲁西地壳运动的重要不整合面之上。蓟县运动造成早前寒武纪结晶基底隆起,形成寒武系底部的不整合,当时鲁西南部隆升幅度大,在马山—四海山古隆起边缘沉积了源自于早前寒武纪幔源镁铁质-超镁铁质岩的李官组中的金刚石;加里东运动产生了石炭系底部的不整合,鲁西中部的徂徕山—蒙山强烈隆起,奥陶纪金伯利岩遭受剥蚀,沉积了本溪组中的金刚石;印支运动—早燕山运动,徂徕山-蒙山隆起继续抬升,表现为侏罗系底部的不整合,沉积了三台组中的金刚石;新生代时,鲁西地壳仍然以徂徕山-蒙山隆起抬升剥蚀为主,由于隆升幅度大,金刚石波及的范围大,在鲁西南部地区沉积了白彦组、小埠岭组和于泉组中等源于金伯利岩的金刚石。

(4)与金刚石相关的幔源岩石地球化学特征指示,鲁西地块不同地质时代的地幔地球化学性状变化为:前寒武纪弱亏损地幔—早古生代弱富集地幔—中生代强烈富集地幔—新生代亏损地幔,早古生代弱富集地幔有利于金刚石富集成矿。

References

Cheng Suhua, Li Jianghai, Chen Zheng, Niu Xianglong. 2006. Geochemical characteristics of the komatiites in Mengyin, Shandong Province, and their implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(2): 14~20 (in Chinese with English abstract).

Chu Zhiyuan, Wang Weide, Lü Qing, Liu Weidong, Kang Congxuan, Wang Shuxing. 2019. The formation age of the kimberlite zone in Poli area of Mengyin, Shandong Province; Ziron U-Pb dating data of diabase. *Geological Bulletin of China*, 38(1): 44~50 (in Chinese with English abstract).

Dobbs P N, Duncan D J, Hu S. 1994. The geology of the Mengyin kimberlites, Shandong, China. In: Meyer H O A, Leonardos O H, eds. *Proc 5th Int Kimb Conf 1. Diamonds: characterisation, genesis and exploration*, CPRM Brasilia, 106~115.

Duan Jiye, Liu Pengju, Xia Deixin. 2002. The preliminary research on tectonic pattern and tectonic evolution of Mesoproterozoic-Paleozoic in North China plate. *Geoscience*, 16(4): 331~228 (in Chinese with English abstract).

Fan W M, Zhang Hongfu, Baker J, Jarvis K E, Mason P R D, Menzies M A. 2000. On and off the North China Craton; Where is the Archaean Keel. *Journal of Petrology*, 41(7): 933~950.

Guo Hua, Xia Bin, Chen Genwen, Wang Runhong, Ding Juhong, Wang Jianjun, Huang Tao. 2005. Geochemistry of basalts during Oligocene in Huimin depression and its geotectonic significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(3): 303~315 (in Chinese with English abstract).

Huang Youbo, Zhou Qizhong, Zhang Qi, Feng Xuezhi, Wang Guoqiang, Zhang Fengming, Cai Yitao. 2019. Geochemical feature of olivine basaltic porphyrite in Tashan area of Xuzhou, Jiangsu Province, and its relation to diamond origin. *Geological Bulletin of China*, 38(1): 132~142 (in Chinese with English abstract).

Kong Fanmei, Li Xuping, Zhao Lingquan, Chen Shuang, Yin Qihang. 2017. Petrography and mineral chemistry of corundum and spinel menocryst in the Cenozoic basalt at Changle, Shandong Province. *Geological Review*, 63(2): 441~457 (in Chinese with English abstract).

Kong Qingyou, Zhang Tianzhen, Yu Xuefeng, Xu Junxiang, Pan Yuanlin, Li Xianshui. 2006. *Shandong Deposit*. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 441~479 (in Chinese).

Li Linhua. 2009. Mesozoic-Cenozoic sedimentary sequence and depositional basin types in the western Shandong. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 16(3): 50~53 (in Chinese with English abstract).

Li Shuguang, Zhang Zongqing. 1990. Nd isotopic composition and evolution of the upper mantle in the Archaean of north China: constraints on the mantle heterogeneity of the unmetasomatic continental lithosphere. *Geochimica*, 4: 277~285 (in Chinese with English abstract).

Liu Fulai, Xu Zhiqin, Song Biao. 2003. Determination of UHP and retrograde metamorphic ages of the Sulu terrane; Evidence from SHRIMP U-Pb dating on zircons of gneissic rocks. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 229~237 (in Chinese with English abstract).

Liu Mingwei. 1995. Division and correlation of the Jurassic strata in Shandong. *Journal of Stratigraphy*, 19(4): 259~263 (in Chinese with English abstract).

Luo Shengxuan, Ren Xirong, Zhu Yuan, Chen Jiyin, Guo Yaping, Wei Tonglin. 1999. *Shandong Diamond Geology*. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1~129 (in Chinese with English abstract).

Qiu Jiansheng, Hu Jian, Jiang Shaoyong, Wang Rucheng, Xu Xisheng. 2005. Mesozoic-Cenozoic mafic magmatism in western Shandong Province and its implication for the chemical evolution of the mantle. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(6): 646~658 (in Chinese with English abstract).

Shen Qihan, Zhang Zongqing, Xu Huifen. 1993. The Sm-Nd isochron age of metabasites in the Yihui complex, Shandong Province, and its geological significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12(4): 289~296 (in Chinese with English abstract).

Song Mingchun, Wang Shanshan, Yang Lixin, Li Jie, Li Shiyong, Ding Zhengjiang. 2017. Metallogenic epoch and geological significance of nonferrous metallic and silver deposits in Jiaodong Peninsula, China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(4): 1305~1325.

Song Mingchun, Li Jie, Li Shiyong, Ding Zhengjiang, Tan Xianfeng, Zhang Zhaolu, Wang Shijin. 2018. Late Mesozoic thermal upwelling-extension structure and its dynamics background in eastern Shandong Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 48(4): 941~964 (in Chinese with English abstract).

Song Mingchun, Song Yingxin, Ding Zhengjiang, Wei Xufeng, Sun Shaoli, Song Guozheng, Zhang Junjin, Zhang Pijian, Wang Yongguo. 2019a. The discovery of the Jiaojia and the Sanshandao giant gold deposits in Jiaodong Peninsula and discussion on the relevant issues. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(1): 92~110 (in Chinese with English abstract).

Song Mingchun, Zhou Jianbo, Song Yingxin, Wang Bin, Li Shiyong, Li Jie, Wang Shanshan. 2019b. Mesozoic Weideshan granitoid suite and its relationship to large-scale gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China. *Geological Journal*, doi. org/10. 1002/gj. 3607;1-22.

- Song Mingchun, Li Jie, Zhou Jianbo, Wang Bing, Li Shiyong, Song Yingxin, Ding Zhengjiang, Tan Xianfeng, Zhang Zhaolu. 2020. The discovery and tectonic setting of the Early Cretaceous high-Mg diorites in the Jiaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 36(1): 279~296 (in Chinese with English abstract).
- Song Yingxin, Song Mingchun, Li Shiyong, Li Jie, Ding Zhengjiang, Tan Xianfeng. 2019. The discovery of three-stage Late Mesozoic metallogenic granitic bodies and 3.5 Ga zircon in the Jiaodong terrane and their metallogenic setting. *Acta Geologica Sinica*, 93(2): 440~458 (in Chinese with English abstract).
- Sun Tao, Li Chao, Zhang Zengqi, Sun Bing, Cheng Wei, Wang Denghong. 2016. Mineralogical characteristics of Taoke Cu-Ni sulfide deposit in Shandong Province and its indications for metallogenic genesis. *Mineral Deposits*, 35(4): 724~736 (in Chinese with English abstract).
- Wang Laiming, Song Mingchun, Liu Jianwen. 1998. High-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic minerals in Jiaonan tectonic belt. *Geology of Shandong*, 14(1): 19~25 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yufeng, Zhou Jun, Wang Jianping, Zhu Chenghe, Yang Xianzhong. 2019. A discussion on geological characteristics and diamond ore-bearing potentiality of the Dajingtou lamprophyte, Pingyi County, Shandong Province. *Geological Bulletin of China*, 38(1): 93~102 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenliang, Wang Dongyan, Wang Haiqing, Lin Jingqian. 2003. Petrology and geochemistry of two types of mantle-derived xenoliths in Mesozoic diorite from western Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 623~636 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chenghai, Xu Wenliang, Yang Debin, Liu Changchun, Liu Xiaoming, Hu Zhaochu. 2006. Petrogenesis of the Mesozoic high-Mg diorites in west Shandong: evidence from chronology and petro-geochemistry. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 44~55 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jinhui, Chung Sunlin, Zhai Mingguo, Zhou Xinhua. 2004. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: Evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle. *Lithos*, 73(3-4): 145~160.
- Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Bai Wenjie, Zhang Zhongming, Rong He. 2014. Features of diamond in ophiolite. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2113~2124 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yueheng, Wu Fuyuan, Wilde S A, Liu Xiaoming, Zhang Yanbin, Xie Liewen, Yang Jinhui. 2009. In situ perovskite Sr-Nd isotopic constraints on the petrogenesis of the Ordovician Mengyin kimberlites in the North China Craton. *Chemical Geology*, 264(1-4): 24~42.
- Yi Zuowei, Lu Fengxiang, Chen Meihua, Xu Hongyi. 2005. Ages and environments of formation of diamonds in Mengyin County, Shandong Province. *Earth Science Frontiers*, 12(4): 614~621 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xiaoyan, Yao Xiaomei, Wang Yunfeng, Han Ping. 2000. Characteristics of Tertiary period basalt of the middle Tanlu belt and the relationship of corundum. *Geology and Prospecting*, 36(3): 28~31 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfu, Yang Yueheng. 2007. Emplacement age and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics of the diamondiferous kimberlites from the eastern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 285~290 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 2011. The evolution from “lithospheric thinning” to “cratonic destruction”. *Progress in Geophysics*, 26(6): 2262~2269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Rongsui, Tang Haosheng, Kong Lingguang, Gan Yanjing, Song Bingzhong. 2001. Characteristics and significance of the Sujiagou komatiite at Mengyin, Shandong. *Regional Geology of China*, 20(3): 236~244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yong, Xing Shuwen, Yin Jiangning, Wang Yan, Ma Yubo. 2016. Geological features and resource potential of the Au-Fe diamond metallogenic belt bounded by central eastern Shandong and northwestern Jiangsu Provinces. *Acta Geologica Sinica*, 90(7): 1470~1481 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongqing, Ling Wenli, Zhang Junbo, Duan Ruichun, Ren Bangfang, Yang Hongmei. 2017. Geochemistry and petrogenesis of the Mesozoic volcanic rocks from the Qingshan Group in western Shandong Province. *Acta Geologica Sinica*, 91(12): 2697~2709 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zengqi, Du Shengxian, Zhang Shangkun, Lu Huinan, Liu Shucui, Gao Liming, Song Xiangsuo, Yang Ning, Liu Fengchen. 2014. Reassessment of the Guanzhuang Group in the Pingyi basin, Shandong. *Journal of Stratigraphy*, 38(1): 8~24 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zongqing. 1998. On the Continental Growth Periods of North China Craton Based on Sm-Nd isotope Characteristics of the Early Precambrian Metamorphic Rocks. *Contributions on the Early Precambrian Geology in North China Craton*. Beijing: Geological Publishing House, 133~136 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xiufang. 2016. Study on diamond characteristics and source in Baiyan conglomerate in Luxi area. *Shandong Land Resources*, 32(4): 27~31 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping. 2009. Comparison of mantle-derived materials from different spatiotemporal settings: Implications for destructive and accretional processes of the North China Craton. *Chinese Sci. Bull.*, 54(14): 1990~2007 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping, Yu Chunmei, Lu Fengxiang, Chen Meihua. 2001. Diamond with multistage growth and its significance for mantle fluid within accreted craton. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 103~109 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping, Dai Hongkun. 2018. Subduction and retreating of the western Pacific plate resulted in lithospheric mantle replacement and coupled basin-mountain respond in the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 61(4): 406~424.
- Zhong Weiguo, Zhou Dengshi, Liu Jitai, Cheng Xiaoping, Xie Lihua. 2003. Study on ore-probing future of diamond primary ore in Dajingtou area of Feixian County in Shandong Province. *Acta Geologica Sinica*, 27(1): 43~49 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Qizhong, Shi Jianbin, Huang Yubo, Feng Xuezhong, Zhang Qi, Zhang Fengming, Cai Yitao, Yang Xianzhong, Kang Congxuan. 2019. Geological characteristics and prospecting significance of kimberlite pipe in Xicun area of Xuzhou, Jiangsu Province. *Geological Bulletin of China*, 38(1): 152~162 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinhua, Yang Jinhui, Zhang Lianchang. 2003. Metallogensis of superlarge gold deposits in Jiaodong region and deep processes of subcontinental lithosphere beneath North China craton in Mesozoic. *Science in China (Series)*, 32(Suppl.): 14~25.

参 考 文 献

- 程素华,李江海,陈征,牛向龙. 2006. 山东蒙阴科马提岩地球化学特征及其意义. *岩石矿物学杂志*, 25(2): 14~20.
- 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. *地质通报*, 38(1): 44~50.
- 段吉业,刘鹏举,夏德馨. 2002. 浅析华北板块中元古代—古生代构造格局及其演化. *现代地质*, 16(4): 331~228.
- 郭华,夏斌,陈根文,王润红,丁桔红,王建军,黄涛. 2005. 惠民凹陷渐新世玄武岩地球化学特征及大地构造意义. *大地构造与成矿学*, 29(3): 303~315.
- 洪大卫,王涛,童英,王晓霞. 2003. 华北地台和苏鲁-大别-秦岭造山带的中生代花岗岩与深部地球动力学过程. *地学前缘*, 10(3): 231~256.
- 黄友波,周琦忠,张琪,冯学知,王国强,张凤鸣,蔡逸涛. 2019. 江苏

- 徐州塔山橄榄玄武玢岩地球化学特征及其与金刚石成因关系. 地质通报, 38(1): 132~142.
- 孔凡梅, 李旭平, 赵令权, 陈爽, 尹启航. 2017. 昌乐地区新生代碱性玄武岩中刚玉、尖晶石巨晶岩相学、矿物化学特征. 地质论评, 63(2): 441~457.
- 孔庆友, 张天祯, 于学峰, 徐军祥, 潘元林, 李献水. 2006. 山东矿床. 济南: 山东省科学技术出版社, 441~479.
- 李临华. 2009. 鲁西中新世盆地充填序列及盆地类型. 油气地质与采收率, 16(3): 50~53.
- 李曙光, 张宗清. 1990. 华北太古代上地幔同位素组成、演化及对该区岩石圈地幔不均一性的制约. 地球化学, 4: 277~285.
- 刘福来, 许志琴, 宋彪. 2003. 苏鲁地体超高压和退变质时代的厘定: 来自片麻岩锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年的证据. 地质学报, 77(2): 229~237.
- 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. 济南: 山东省科学技术出版社, 1~129.
- 刘明渭. 1995. 山东侏罗纪地层划分与对比. 地层学杂志, 19(4): 259~263.
- 路凤香, 郑建平. 1996. 华北地台古生代岩石圈地幔特征及深部过程. 见: 池际尚, 路凤香主编. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京: 科学技术出版社, 215~274.
- 邱检生, 胡建, 蒋少涌, 王汝成, 徐夕生. 2005. 鲁西中、新生代镁铁质岩浆作用与地幔化学演化. 地球科学——中国地质大学学报, 30(6): 646~658.
- 沈其韩, 徐惠芬, 张宗清, 高吉凤, 伍家善, 吉成林. 1992. 中国早前寒武纪麻粒岩. 北京: 地质出版社, 1~237.
- 沈其韩, 张宗清, 徐惠芬. 1993. 山东沂水杂岩中变基性岩类的 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 12(4): 289~296.
- 宋明春, 王沛成. 2003. 山东省区域地质. 济南: 山东省地图出版社, 17~232.
- 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. 北京: 地质出版社, 1~274.
- 宋明春, 李杰, 李世勇, 丁正江, 谭现锋, 张照录, 王世进. 2018. 鲁东晚中生代热隆伸展构造及其动力学背景. 吉林大学学报(地球科学版), 48(4): 941~964.
- 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 魏绪峰, 孙绍立, 宋国政, 张军进, 张丕建, 王永国. 2019. 胶东焦家和三山岛巨型金矿床的发现及有关问题讨论. 大地构造与成矿学, 43(1): 92~110.
- 宋明春, 李杰, 周建波, 宋英昕, 李世勇, 王斌, 丁正江, 张照录. 2020. 胶东早白垩世高镁闪长岩类的发现及其构造背景. 岩石学报, 36(1): 279~296.
- 宋英昕, 宋明春, 李世勇, 李杰, 丁正江, 谭现峰. 2019. 胶东晚中生代三期成矿岩体和 3.5Ga 锆石的发现及成矿动力学背景. 地质学报, 93(2): 440~458.
- 孙涛, 李超, 张增奇, 孙斌, 程伟, 王登红. 2016. 山东桃村铜镍矿床矿物学特征及其对矿床成因的指示. 矿床地质, 35(4): 724~736.
- 王来明, 宋明春, 刘建文. 1998. 胶南造山带中高压超高压变质矿物. 山东地质, 14(1): 19~25.
- 王玉峰, 周军, 王建平, 朱成河, 杨献忠. 2019. 山东省平邑县大井头钾镁煌斑岩地质特征及金刚石含矿性. 地质通报, 38(1): 93~102.
- 许文良, 王冬艳, 王清海, 林景任. 2003. 鲁西中生代闪长岩中两类幔源捕虏体的岩石学和地球化学. 岩石学报, 19(4): 623~636.
- 杨承海, 许文良, 杨德彬, 刘长春, 柳小明, 胡兆初. 2006. 鲁西中生代高 Mg 闪长岩的成因: 年代学与岩石地球化学证据. 地球科学—中国地质大学学报, 31(1): 44~55.
- 杨经绥, 徐向珍, 白文吉, 张仲明, 戎合. 2014. 蛇绿岩型金刚石的特征. 岩石学报, 30(8): 2113~2124.
- 尹作为, 路凤香, 陈美华, 徐红奔. 2005. 山东蒙阴金刚石的形成时代及地质环境. 地学前缘, 12(4): 614~621.
- 余晓艳, 姚晓梅, 汪云峰, 韩萍. 2000. 郯庐断裂带中段第三纪玄武岩特征及与刚玉形成的关系. 地质与勘探, 36(3): 28~31.
- 于学峰, 宋明春, 李大鹏, 田京祥, 王来明. 2016. 山东金矿找矿突破进展与前景. 地质学报, 90(10): 2487~2862.
- 张宏福, 杨岳衡. 2007. 华北板块东部含金刚石金伯利岩的侵入年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学特征. 岩石学报, 23(2): 285~290.
- 张旗. 2011. 从“岩石圈减薄”到“克拉通破坏”. 地球物理学进展, 26(6): 2262~2269.
- 张荣隋, 唐好生, 孔令广, 甘延景, 宋炳忠. 2001. 山东蒙阴苏家沟科马提岩的特征及其意义. 中国区域地质, 20(3): 236~244.
- 张勇, 邢树文, 阴江宁, 王岩, 马玉波. 2016. 鲁中东—苏西北 Au-Fe 金刚石成矿带特征及资源潜力. 地质学报, 90(7): 1470~1481.
- 张永清, 凌文黎, 张军波, 段瑞春, 任邦方, 杨红梅. 2017. 山东西部中生代青山群火山岩的地球化学特征及其岩石成因. 地质学报, 91(12): 2697~2709.
- 张增奇, 杜圣贤, 张尚坤, 卢辉楠, 刘书才, 高黎明, 宋香锁, 杨宁, 刘凤臣. 2014. 山东平邑盆地官庄群有关地层的重新厘定. 地层学杂志, 38(1): 8~24.
- 张宗清. 1998. 从华北古陆早前寒武纪变质岩的 Sm-Nd 同位素特征论其地壳的主要生长时期. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集. 北京: 地质出版社, 133~136.
- 赵秀芳. 2016. 鲁西白彦砾岩中金金刚石特征及来源探讨. 山东国土资源, 32(4): 27~31.
- 郑建平. 2009. 不同时空背景幔源物质对比与华北深部岩石圈破坏和增生置换过程. 科学通报, 54(14): 1990~2007.
- 郑建平, 余淳海, 路凤香, 陈美华. 2001. 不连续生长的金刚石与克拉通地块内部增生过程中的地幔流体作用. 地学前缘, 8(3): 103~109.
- 仲卫国, 周登诗, 刘继太, 程晓萍, 解丽华. 2003. 山东费县大井头地区金刚石原生矿找矿前景探讨. 山东地质, 19(1): 43~49.
- 周登诗. 2015. 钻石之路. 北京: 地质出版社, 1~103.
- 周琦忠, 施建斌, 黄友波, 冯学知, 张琪, 张凤鸣, 蔡逸涛, 杨献忠, 康丛轩. 2019. 江苏徐州西村金伯利岩管地质特征及其找矿意义. 地质通报, 38(1): 152~162.

Types, sources, and regional crust-mantle evolution background of diamonds in the western Shandong Province

SONG Mingchun^{*1)}, YU Xishun²⁾, SONG Yingxin³⁾, XIAO Bingjian²⁾,
ZHOU Dengshi²⁾, GAO Cunshan²⁾, FENG Aiping²⁾

1) Shandong Provincial No. 6 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Weihai, Shandong, 264209;

2) Shandong Provincial No. 7 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Linyi, Shandong, 276006;

3) Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization Subordinated to the Ministry of Land and Resources, Jinan, 250013

* Corresponding author: mingchuns@163.com

Abstract

There are two types of diamond ores, the primary diamond ore and the alluvial diamond ore, with industrial value in the western Shandong Province. Diamond-bearing mother rocks of primary diamond ores are mainly kimberlite and lamprophyre. Diamond-bearing mother rocks of alluvial diamond ores are conglomerate and sandstone occurring in the Quaternary Xiaobuling and the Yuquan Formations. The Cambrian Liguan, the Carboniferous Benxi, the Jurassic Santai, the Neogene Baiyan Formations and the Paleogene Guanzhuang Group are also diamond-bearing strata, but do not meet the industrial utilization requirement. Compared to the diamonds contained in these reservoirs, the diamond particle size in the Mengyin and the Feixian of the Benxi Formation is the largest, the diamond content in the Pingyi-Sishui area of the Baiyan Formation is the richest, the proportion of complete crystal shape in the Linyi Jinqieshan of the Santai Formation is the highest, and the erosion and roundness in the Zaozhuang Shangnihe and the Sishui Xuezhuang area of the Liguan Formation are most prominent. Different strata and types of diamond indicate different source regions, formation age and tectonic background. Lithofacies and paleogeography analyses show that the diamonds of the Liguan Formation originated from southwest of ultramafic rocks in the Early Precambrian crystal basement of the Mashan-Sihaishan region. These ultramafic rocks were formed in the Neoproterozoic followed by the Early Precambrian crystal basement uplift in the Late Proterozoic. The ultramafic rocks thereafter underwent denudation. Finally, a small amount of diamonds were deposited in the Liguan Formation conglomerates at the base of the Cambrian. The distribution and characteristics of diamonds in the Benxi and the Santai Formations indicates that the source region is the Mengyin kimberlite. The kimberlite in the Mengyin was formed in the Early-Middle Ordovician. After the formation of kimberlite, the Caledonian and Indosinian Movement-the Early Yanshan Movement resulted in the uplift of the Culaishan-Mengshan district. Afterwards, the kimberlites were lifted to the surface and denuded, and the diamonds were deposited in conglomerate of the Benxi and Santai Formations. The distribution and characteristics of diamonds in the Guanzhuang Group, and the Baiyan, the Xiaobuling and the Yuquan Formations indicates that they also mainly come from the Mengyin kimberlites. The Cenozoic Culaishan-Mengshan in the north of the western Shandong Province is still in a strong uplift state, which results in the distribution of the Baiyan, the Xiaobuling, and the Yuquan Formations diamond enrichment areas in the south of the western Shandong Province. The geochemical characteristics of the diamond source region in different ages indicates chemical evolution of mantle. North China block from Archean to Paleoproterozoic mantle source region with $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ value from $+0.5$ to $+4$ indicates that the upper mantle is in a weak deficit condition. The $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ value of kimberlite in the western Shandong Province varied from -4.78 to $+2.76$, suggesting that the Paleozoic mantle was in a state of weak enrichment. The $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ value of Mesozoic mafic rocks in the western Shandong Province varied from -9.2 to $+21.21$, suggesting that the Mesozoic mantle was in a state of strong enrichment. Diamond deposits in kimberlite pipes were derived from the early Paleozoic weakly enriched mantle in the western Shandong Province.

Key words: diamond; reservoir stratum; unconformity; mantle; tectonic movement; western Shandong Province