

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.05.09

引用格式: 张琪,周琦忠,王博,等.苏北原生金刚石找矿现存问题探讨[J].中国地质调查,2022,9(5):79-88.(Zhang Q, Zhou Q Z, Wang B, et al. The discussion of primary diamonds exploration in Northern Jiangsu Province[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(5): 79-88.)

苏北原生金刚石找矿现存问题探讨

张琪,周琦忠,王博,王国强,冯学知,罗跃

(江苏省地质矿产局第五地质大队,江苏徐州 221004)

摘要:苏北第二轮金刚石找矿历时8 a,尚未发现含矿的金伯利岩或金刚石矿床。从苏北找矿实际出发,结合最新的金刚石成矿理论和进展,提出和探讨了制约苏北原生金刚石找矿的几个问题,进一步探讨了找矿方向。研究认为:苏北原生金刚石找矿的首要目标为古生代金伯利岩,在郯庐断裂带西侧,由于徐宿弧形构造的存在,可能使得该期金伯利岩被掩盖于推覆体之下;郯庐断裂带与古生代金伯利岩没有成因联系,但其在伸展阶段控制发育的断陷红盆,可能使得带内的古生代金伯利岩被掩盖在白垩系之下。今后的找矿方向应重点集中在郯庐断裂带内的城岗隆起上,郯庐断裂带西侧的含角砾基性岩亦是值得关注的对象。在开展找矿勘查时,应充分考虑工作区地质与地形条件、方法适应性和局限性等因素,因地制宜选择勘查方法组合。

关键词:苏北地区;原生金刚石找矿;金伯利岩;构造;找矿方向

中图分类号: P612; P618 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2022)05-0079-10

0 引言

苏北地区位于华北陆块东南缘,成矿条件良好,为全国金刚石原生矿A类成矿远景区。20世纪60年代至80年代末,苏北开展了第一轮金刚石找矿,相继在新沂—宿迁、徐州—邳州等地的第四系松散层中发现了200多颗金刚石,在新沂市王圩村提交了1处小型砂矿产地,但原生金刚石找矿一直未有突破^[1]。2013年,苏北启动了第二轮金刚石找矿,相继在铜山张集、泗洪梅花、贾汪塔山、铜山吴桥—邳州石匣、铜山西村等地开展了金刚石原生矿普查、调查及研究工作,共发现辉绿岩、橄榄玄武岩和橄榄玄武质隐爆火山角砾岩等3种金刚石寄主岩体,选获6颗原生金刚石,发现金伯利岩4处^[1-4]。

苏北第二轮金刚石找矿历时8年,虽取得一定进展,但尚未取得重大突破,尚未发现含矿的金伯利岩或金刚石矿床。从目前的找矿思路、找矿线索

以及找矿进程来看,今后的找矿前景和找矿难度极大,尚存在很多亟待解决的问题。前人对苏北原生金刚石找矿的研究,多集中在基性-超基性岩地球化学特征及成因、成矿条件及金刚石成因等方面^[1-5],并不能直接指导苏北金刚石找矿。笔者以近几年找矿实践为基础,结合最新的金刚石成矿理论和进展,提出和探讨制约苏北原生金刚石找矿的几个问题,以期为今后找矿提供指导。

1 区域地质背景

苏北地区位于江苏省北部的徐州、宿迁一带,地跨华北陆块、苏鲁造山带和扬子陆块三大构造单元,苏北金刚石找矿区域主要位于郯庐断裂带及西侧的华北陆块区内^[2-4]。郯庐断裂带内基底为元古宇东海变质岩群,其上覆盖白垩系王氏组紫红色碎屑岩,缺失晚古生界之前的沉积盖层。郯庐断裂带西侧基底为新太古界泰山岩群,上覆新元古界碳酸盐岩和碎屑岩,厚达数千米。

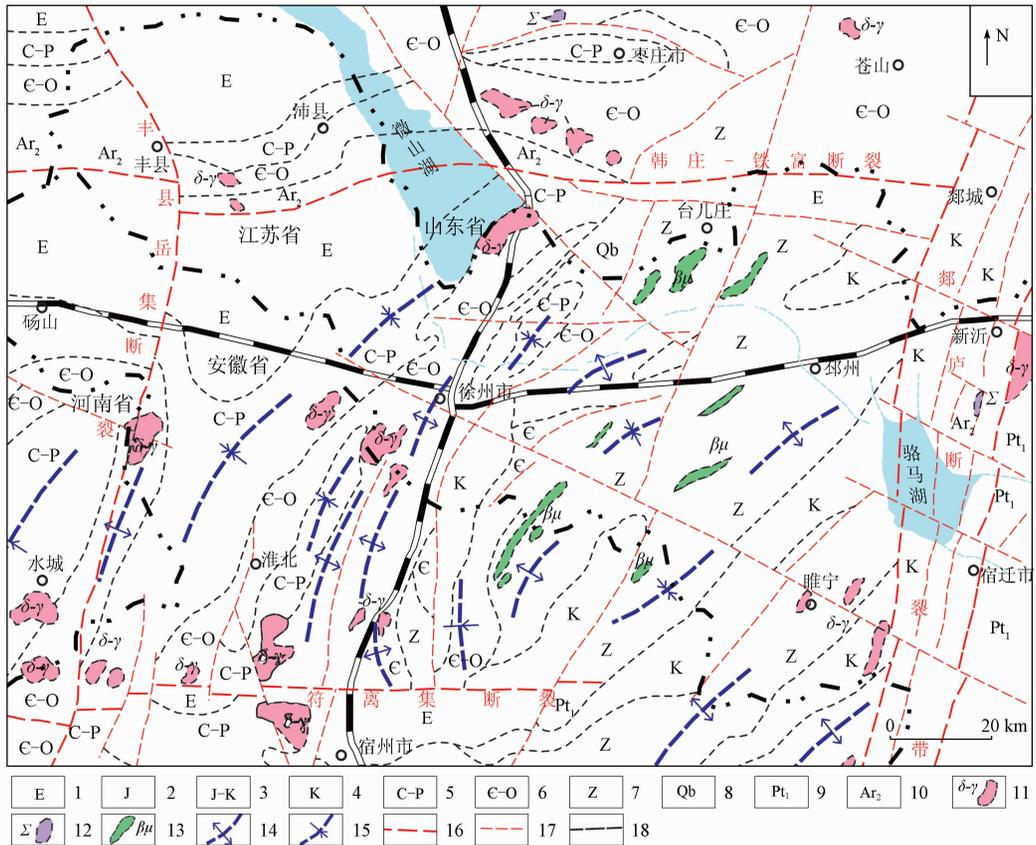
收稿日期:2021-11-06;修订日期:2022-03-24。

基金项目:江苏省自然资源发展专项“江苏省新沂市城岗地区金刚石原生矿普查(编号:苏财资环[2021]46号)”项目资助。

第一作者简介:张琪(1985—),女,高级工程师,主要从事地质矿产勘查与研究工作。Email: dzwdzqz@foxmail.com。

苏北区域构造运动较频繁,多旋回构造运动导致区内褶皱、断裂发育,形成错综复杂的构造格架^[2-4]。褶皱主要发育在印支—燕山期,郯庐断裂带西侧的徐—宿弧形断褶带内发育一系列轴向呈NNE渐转为NEE向的复式褶皱,区域内主要为NE、NNE、NW及近EW向断裂,多期活动性明显,NNE向的郯庐断裂带是区域规模最大、切割最深的一组深大断裂,NW向的废黄河断裂、微山湖断裂和近EW向的韩庄—铁富断裂均为基底断裂(图1)。

徐州地区岩浆岩较发育,岩石类型从超基性、基性到酸性均有发育。郯庐断裂带西侧主要有3期活动:新元古代以辉绿岩为主;中生代(燕山期)以中酸性侵入岩为主,包括利国岩体和班井岩体;新生代(喜山期)以橄榄玄武岩、煌斑岩、金伯利岩、安山玢岩等脉岩为主,在空间上明显受NNE向断裂的控制而呈脉状展布。郯庐断裂带内主要发育3期活动,包括元古宙的变质侵入岩、中生代喷出岩(青山旋回)以及新生代的脉岩。



1. 古近系; 2. 侏罗系; 3. 侏罗系—白垩系; 4. 白垩系; 5. 石炭系—二叠系; 6. 寒武系—奥陶系; 7. 震旦系; 8. 青白口系; 9. 古元古界; 10. 中太古界; 11. 中—酸性岩; 12. 超基性岩; 13. 辉绿岩; 14. 复式背斜; 15. 复式向斜; 16. 基底深大断裂; 17. 区域断裂; 18. 地层不整合界线。

图1 苏北地区构造格架

Fig.1 Tectonic framework of Northern Jiangsu Province

2 原生金刚石含矿母岩类型和时代

2.1 含矿母岩类型

目前已发现金刚石的岩石类型除金伯利岩和钾镁煌斑岩外,还有榴辉岩、蛇绿岩套、碱性超基性杂岩、碱性超基性煌斑岩和橄榄岩类等多种偏碱性的超镁铁质岩石^[7],包括安徽栏杆地区辉绿岩以及

苏北地区辉绿岩、橄榄玄武岩和橄榄玄武质隐爆火山角砾岩^[3-4]。

从经济价值角度来看,目前世界上已知的金刚石矿均赋存于金伯利岩和钾镁煌斑岩内,其他岩石类型中的金刚石含量很少且缺乏大颗粒金刚石,经济价值有限。2010年,在安徽宿州栏杆地区的辉绿岩中发现了微粒金刚石,受此影响,近几年在苏北地区开展的金刚石找矿工作主要集中在辉绿岩、橄

榄玄武岩甚至煌斑岩等偏碱性-碱性基性-超基性岩上,选获了6颗原生金刚石,但工业价值不大。因此,需要进一步明确找矿目标为金伯利岩型或钾镁煌斑岩型金刚石原生矿,排除辉绿岩、橄橄榄玄武岩、煌斑岩等其他岩石类型。

2.2 华北金伯利岩侵位时代

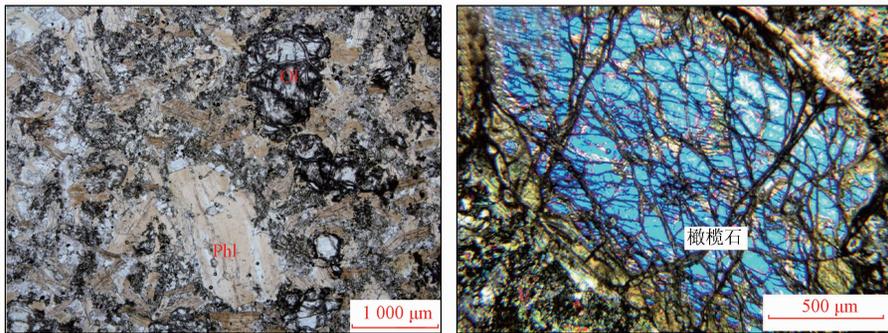
华北板块金伯利岩岩浆活动主要分为3个时期^[8]:一为中元古代(1 649~1 181 Ma),以山西阳高岩区麻地沟金伯利岩及饮牛沟钾镁煌斑岩为代表;二为古生代,以辽宁复县和山东蒙阴金伯利岩为代表(462~457 Ma);三为中生代-新生代,以河南鹤壁和涉县金伯利岩为代表(117~52 Ma),苏北金伯利岩亦属于该期活动的产物。其中,仅辽宁复县和山东蒙阴两地发现了金刚石原生矿,其他地区金伯利岩则不含矿^[9]。

不同时期金伯利岩含矿性的差异,与华北陆块不同时期的区域构造活动密切相关^[8]。金刚石的形成需要厚而稳定的岩石圈、低氧逸度和亏损的地幔环境^[10],而华北陆块在古生代之前总体是稳定的,热流值较低,其岩石圈厚度达到200 km,适合金

刚石的生长和保存。此外,大陆克拉通的造陆运动是形成金伯利岩岩浆必要的大地构造背景,华北陆块自中奥陶世发生了大规模的造陆上升,是古生代含矿金伯利岩活动的根本原因。中生代-新生代,受太平洋板块俯冲的影响,地幔温度升高,软流圈上隆,导致华北陆块岩石圈减薄至80 km,这一背景明显不利于金刚石的保存,鹤壁与涉县金伯利岩含矿性差可能与此有关^[8,10-12]。

2.3 苏北金伯利岩类型及年代

目前,在苏北地区共发现4处金伯利岩,包括1处岩管和3条岩脉,集中分布于徐州柳泉-利国一带,走向总体为NE 15°~50°,倾角较陡立,侵入至寒武系-奥陶系碳酸盐岩中。岩石类型主要包括青灰色或紫红色斑状金伯利岩和含角砾斑状金伯利岩,具斑状结构、块状构造,斑晶矿物主要为金云母、单斜辉石和橄榄石(多已碳酸盐化),基质矿物主要为金云母、辉石、蚀变矿物和不透明矿物(图2)。含浑圆状角砾,成分包括辉石岩和辉橄岩等暗色超基性岩以及基底片麻岩、中酸性岩、围岩等。



(a) 金云母和橄榄石斑晶

(b) 橄榄石斑晶

Ol. 橄榄石; Phl. 金云母。

图2 苏北金伯利岩镜下照片

Fig. 2 Photomicrographs of kimberlite in Northern Jiangsu Province

为了测定苏北金伯利岩的年龄,从柳泉-利国一带的角砾斑状金伯利岩中挑选出锆石,对其进行U-Pb同位素测年。锆石单矿物的挑选工作由河北省廊坊市区域地质调查研究所实验室完成,采用磁选、重液分选及镜下观察等方法;制靶工作由南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成;锆石U-Pb同位素测年采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS),由武汉上谱分析科技有限责任公司完成。测试采用的剥蚀系统激光波长为213 nm,激光脉冲频率为5 Hz,剥蚀孔径为32 μm,剥蚀时

间为60 s,背景测量时间为40 s,脉冲能量为10~20 J/cm²,应用锆石标样GJ-1进行同位素分馏校正,GJ-1锆石标样的测试值为(601±1.2) Ma,每轮测试开始和结束前,分别分析标样2次。

测年结果显示,苏北金伯利岩中锆石年龄主要分为3组(图3,表1)。一组锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄介于2 500~2 381 Ma之间,加权平均年龄为(2 476±27) Ma,第二组仅有2颗锆石,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄介于1 837~1 713 Ma之间;前两组应该是岩浆侵位过程中捕获的基底锆石,这两期的年龄与华北

克拉通东部陆块普遍发生的 2.5 Ga 和 1.8 Ga 两期岩浆事件完全吻合。第三组有 8 颗最年轻锆石的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄位于 143 ~ 129 Ma 之间,加权平

均年龄为(135.8 ± 4.3) Ma,该年龄约束了苏北金伯利岩浆活动时代的上限,表明苏北金伯利岩形成于晚中生代—新生代。

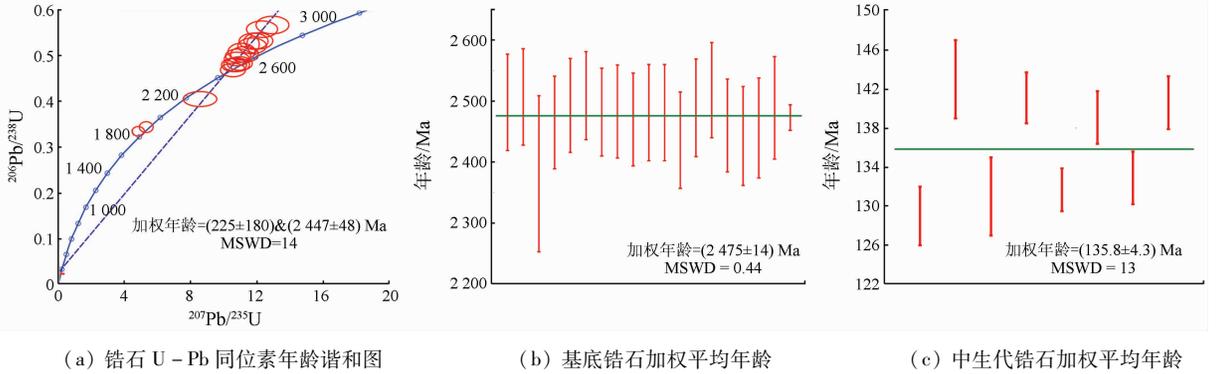


图 3 苏北金伯利岩中的锆石 U - Pb 同位素年龄谐和图
 Fig.3 U - Pb age concordia diagrams of kimberlite in Northern Jiangsu Province
 表 1 苏北金伯利岩 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄测试结果

Tab.1 LA - ICP - MS zircon U - Pb isotopic age data of kimberlite in Northern Jiangsu area

点号	同位素比值及误差						年龄及误差/Ma									
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ
1	0.164 0	0.007 5	11.173 2	0.655 5	0.495 1	0.013 1	0.149 4	0.007 2	2 498	79	2 538	55	2 593	56	2 814	127
2	0.164 9	0.007 5	10.977 5	0.647 8	0.483 8	0.013 1	0.131 2	0.006 5	2 507	79	2 521	55	2 544	57	2 492	117
3	0.153 1	0.011 0	8.554 7	0.814 9	0.405 5	0.013 3	0.113 4	0.003 3	2 381	128	2 292	87	2 193	61	2 171	60
4	0.160 9	0.007 3	10.620 8	0.622 8	0.479 7	0.012 6	0.134 3	0.006 5	2 465	76	2 491	54	2 526	55	2 547	116
5	0.163 6	0.007 5	10.553 4	0.625 5	0.468 9	0.012 6	0.130 4	0.006 3	2 493	77	2 485	55	2 479	55	2 478	113
6	0.165 1	0.007 6	12.095 2	0.716 0	0.532 3	0.014 1	0.148 5	0.007 8	2 509	72	2 612	56	2 751	59	2 798	128
7	0.162 5	0.007 5	11.018 8	0.653 6	0.492 6	0.013 2	0.136 8	0.006 7	2 482	72	2 525	55	2 582	57	2 592	119
8	0.054 7	0.002 8	0.151 5	0.009 5	0.020 2	0.000 5	0.006 9	0.000 3	399	111	143	8	129	3	139	7
9	0.162 6	0.007 5	10.829 2	0.642 5	0.483 9	0.012 7	0.132 0	0.006 5	2 483	76	2 509	55	2 544	55	2 505	115
10	0.112 3	0.005 2	5.295 3	0.313 5	0.342 7	0.009 0	0.099 3	0.004 9	1 837	79	1 868	51	1 900	43	1 913	90
11	0.161 4	0.007 7	11.806 9	0.713 4	0.531 7	0.014 2	0.149 1	0.007 4	2 470	76	2 589	57	2 749	60	2 808	129
12	0.104 9	0.004 9	4.815 0	0.286 5	0.333 5	0.008 7	0.091 4	0.004 5	1 713	81	1 788	50	1 855	42	1 768	83
13	0.162 4	0.007 6	11.125 7	0.668 2	0.497 7	0.013 2	0.139 1	0.006 9	2 481	79	2 534	56	2 604	57	2 633	122
14	0.162 4	0.007 6	11.245 4	0.675 7	0.503 2	0.013 5	0.137 0	0.006 8	2 481	79	2 544	56	2 627	58	2 596	120
15	0.158 2	0.007 4	11.093 6	0.664 7	0.509 5	0.013 5	0.140 4	0.006 9	2 436	79	2 531	56	2 655	58	2 655	123
16	0.163 2	0.007 8	11.711 2	0.708 7	0.521 3	0.013 9	0.147 5	0.007 4	2 489	80	2 582	57	2 705	59	2 781	129
17	0.046 5	0.007 4	0.143 8	0.025 4	0.022 4	0.000 7	0.007 2	0.000 5	22	257	136	23	143	4	144	9
18	0.166 0	0.008 1	12.951 1	0.800 4	0.566 8	0.015 5	0.155 4	0.007 8	2 518	78	2 676	58	2 895	64	2 920	137
19	0.160 4	0.007 6	12.311 1	0.746 1	0.557 5	0.014 8	0.147 2	0.007 4	2 460	76	2 628	57	2 856	61	2 776	130
20	0.158 8	0.007 4	10.883 6	0.654 0	0.497 9	0.013 1	0.133 2	0.006 6	2 443	81	2 513	56	2 605	57	2 527	118
21	0.160 0	0.007 6	10.846 4	0.655 0	0.492 5	0.013 0	0.132 0	0.006 6	2 456	82	2 510	56	2 581	56	2 507	118
22	0.050 7	0.003 1	0.143 8	0.010 3	0.020 6	0.000 6	0.006 3	0.000 3	228	147	136	9	131	4	126	6
23	0.163 2	0.007 6	10.776 3	0.646 5	0.479 8	0.012 5	0.130 1	0.006 5	2 489	84	2 504	56	2 527	54	2 473	117
24	0.104 0	0.011 0	0.323 0	0.037 0	0.022 1	0.000 4	0.009 9	0.000 8	1 610	190	280	27	141	3	199	17
25	0.054 1	0.002 7	0.155 7	0.008 5	0.020 6	0.000 4	0.006 9	0.000 7	370	120	147	7	132	2	138	13
26	0.067 5	0.003 6	0.202 0	0.010 0	0.021 8	0.000 4	0.008 5	0.000 8	810	120	187	9	139	3	170	15
27	0.161 9	0.002 1	11.760 0	0.300 0	0.526 0	0.013 0	0.165 0	0.011 0	2 473	21	2 583	23	2 723	54	3 080	180
28	0.057 9	0.004 8	0.166 0	0.013 0	0.020 8	0.000 4	0.007 1	0.000 5	450	150	155	11	133	3	143	9
29	0.061 3	0.002 9	0.186 2	0.009 4	0.022 1	0.000 4	0.008 9	0.000 6	610	110	173	8	141	3	179	13

苏北金伯利岩的成岩时代与华北中—新生代金伯利岩岩浆的活动时期是一致的,形成于华北岩石圈减薄背景下,不利于金刚石的形成和保存,成矿的可能性不大。因此,从含矿金伯利岩侵入时代和大地构造背景来看,古生代金伯利岩是苏北金刚石找矿的首要目标,但苏北地区岩浆活动期次包括新元古代辉绿岩、中生代中酸性岩和新生代脉岩,尚未发现古生代岩浆活动的证据,这无疑增大了苏北金刚石找矿的难度。

3 构造与原生金刚石成矿的关系

探讨构造与金刚石原生矿或金伯利岩是否存在密切的成因关系,其中的关键点在于构造的活动时间与金伯利岩岩浆活动时间之间时间上的先后关系。

3.1 郯庐断裂带与成矿的关系

郯庐断裂带作为苏北地区规模最大、深切至地幔的区域深大断裂,是幔源岩浆上升的主要通道。20世纪90年代以来,大多数学者认为该断裂受控于太平洋板块运动所产生的区域动力,主要经历了3个阶段的演化,即晚侏罗世—早白垩世的走滑运动、晚白垩世—古近纪的伸展运动和新近纪以来的挤压逆冲活动^[13-16]。而华北陆块的古生代金伯利岩在郯庐断裂带开始活动之前就已就位,其形成与郯庐断裂带无关,即郯庐断裂带不是古生代金伯利岩的导岩或控岩构造。

通过对比苏北和辽宁金伯利岩区的地层,可以发现两地奥陶系之前的地层是基本吻合的(表2),这可能是郯庐断裂带的走滑平移作用将两地错断所致^[17]。郯庐断裂带在金伯利岩形成后可能起到破坏作用,苏北地区具有存在古生代金伯利岩的可能性。

此外,郯庐断裂带在伸展运动阶段,其内部广泛控制发育了断陷红盆^[13],在江苏段沉积了白垩系王氏组紫红色含砾砂岩,并伴随着青山组火山岩(裂谷产物)的喷发。因此,在白垩系王氏组和青山组火山岩分布区,古生代金伯利岩会被掩盖其下,不具备寻找金刚石原生矿的条件。

在郯庐断裂带内,除了广泛发育的白垩系王氏组和青山组火山岩外,局部还存在地壳上隆,并在城岗一带形成城岗隆起,隆起带内发育新太古代基底变质岩。该地区围岩条件与山东金伯利岩

区相似,其围岩均为新太古代基底变质岩^[18]。因此如果存在古生代金伯利岩岩浆活动,只可能出现在城岗隆起上,而城岗隆起的外围则被覆盖在白垩系之下。

表2 苏北和辽宁地区奥陶系之前地层对比简表

Tab.2 Brief table of stratigraphic comparison before Ordovician in Northern Jiangsu and Liaoning area

年代地层	地层名称(代号)	
	苏北地区	辽宁地区
上寒武统	凤山组(E_3f)	凤山组(E_3f)
	长山组(E_3c)	长山组(E_3c)
	崮山组(E_3g)	崮山组(E_3g)
寒武系	中寒武统	张夏组(E_2z)
	徐庄组(E_2x)	徐庄组(E_2x)
	毛庄组(E_2m)	毛庄组(E_2m)
下寒武统	馒头组(E_1m)	馒头组(E_1m)
	猴家山组(E_1h)	碱厂组(E_1j)
	望山组(Zwn)	兴民村组(Zx)
震旦系	史家组(Zs)	北山组(Zb)
		马家屯组(Zm)
	魏集组(Zw)	十三里台组(Zs)
		营城子组(Zyc)
	张渠组(Zzh)	甘井子组(Zg)
	九顶山组(Zjd)	倪园组(Zn)
青白口系	赵圩组(Zz)	南关岭组(Zn)
	城山组上段(Zc^2)	长岭子组(Zc)
	城山组下段(Zc^1)	桥头组(Qbq)
	土门群($Qbtm$)	南芬组(Jxn)

3.2 徐宿弧形构造与成矿的关系

徐宿弧形构造处于华北陆块东南缘、郯庐断裂带西侧。根据1:50 000区域地质调查报告^[19],徐宿弧形构造的形成开始于新元古代,完成于古生代,大致可分为3个发育阶段:新元古代—古生代华力西期的形成阶段、印支期—燕山早期的形成及改造阶段以及燕山早期的形成阶段^[19]。根据构造的空间分布和复杂程度,可分为外带、中带和内带3部分:外带主要为青龙山断裂以西地区,构造形态简单,主要由石炭系和二叠系组成;中带为位于青龙山断裂和张集—栏杆冲断层之间的构造变形区,发育一系列的复式褶皱,轴线向北西呈弧形突出,背斜核部多由青白口系、震旦系和寒武系组成,向斜核部为石炭系和二叠系;内带为张集—栏杆冲断层以东的构造变形区,以开阔平缓的褶皱和低角度逆掩断裂为主,震旦系和新元古代辉绿岩广泛分布^[19]。

从郯庐断裂带西侧的金伯利岩、原生金刚石和

指示矿物的分布位置来看,苏北金伯利岩位于徐宿弧形构造的外带,在基岩或松散物中均未发现金刚石或指示矿物;塔山原生金刚石分布于中带,在其附近的松散物中发现了金刚石;白露山岩体位于内带,从中发现了3颗原生金刚石和S1、S2组铬铁矿^[6];寺山岩体位于内、外带交界部位,从中选获了1颗G9组镁铝榴石。由此可知,外带虽有金伯利岩出露,但其形成背景预示着其含矿的可能性很小,而在中带和内带发现的金刚石砂矿、白露山大颗粒原生金刚石以及标型指示矿物(G9组镁铝榴石),均表明它们可能来自金伯利岩。

从构造和岩浆活动时代上看,古生代金伯利岩的侵位时代正好处于徐宿弧形构造形成的早中期,在徐宿弧形构造后期由于大规模的逆冲推覆,使得新地层或岩浆岩被老地层覆盖,因此古生代金伯利岩可能被掩盖于推覆体之下。

白露山岩体中大颗粒金刚石的特征与微粒金刚石明显不同,其形态经熔蚀具浑圆状(图4),为典型的地幔捕虏晶(金伯利岩型金刚石的特征形态),但其赋存岩石为橄榄玄武岩,暗示了橄榄玄武岩在上升过程中可能捕获了含矿金伯利岩。因此,对于含较多成分复杂角砾的基性岩来说,其中发育含矿金伯利岩亦是可能的。



图4 白露山岩体中的金刚石镜下照片

Fig.4 Microscope photos of diamond in Bailu Mountain rock mass

4 指示矿物对原生金刚石的指示意义

镁铝榴石、铬透辉石、铬铁矿等作为与金刚石

紧密共生的矿物,对寻找金刚石矿具有重要的指示作用,利用其矿物地球化学等特征可有效地判别金刚石含矿性。

4.1 镁铝榴石

石榴子石是金伯利岩中重要的指示矿物之一,其氧化物含量及颜色、折光率等物理光学性质可作为石榴子石的标型特征^[20-21]。Dawson等^[22]采用聚类分析方法将不同产状的石榴子石分为12组,其中G10(低钙-高铬镁铝榴石)、G9(铬-镁铝榴石)组镁铝榴石($w(\text{Cr}_2\text{O}_3) > 4\%$)是金刚石矿的标型指示矿物^[23]。

目前,苏北基性-超基性岩中发现G9和G10组镁铝榴石的岩体仅包括圣庵和寺山橄榄玄武岩岩体。苏北金伯利岩中的镁铝榴石多是含铬镁铝榴石^[2],缺乏G9和G10组镁铝榴石,其含矿性可能较差。松散物中的G9和G10组镁铝榴石主要分布在郯庐断裂带内的新沂城岗-王圩和泗洪梅花地区^[1],郯庐断裂带西侧未发现。

4.2 铬透辉石

铬透辉石属橄榄岩型组合,在地表环境中很不稳定,搬运过程中容易磨损甚至消失,难以形成较大范围的次生分散晕。作为寻找金刚石原生矿的指示矿物,铬透辉石在区域找矿上不及镁铝榴石、铬铁矿等重要,但一经发现,就表明离其供源地不远。同时,铬透辉石中的 Cr_2O_3 含量也可指示金伯利岩的含矿性,金伯利岩中 $w(\text{Cr}_2\text{O}_3) \geq 1.5\%$ 的高铬铬透辉石含量越多,金刚石品位越高^[22]。

基性-超基性岩中仅苏北金伯利岩含铬透辉石,但其 Cr_2O_3 含量普遍低于1.5%,缺少高铬铬透辉石。

松散物中发现的铬透辉石很少,仅在郯庐断裂带内的新沂城岗-王圩地区发现高铬铬透辉石,表明新沂城岗-王圩地区可能存在近源的含矿金伯利岩。

4.3 铬铁矿

高铬铬尖晶石类矿物是金伯利岩及其深源包体中极其重要的一类矿物,不仅可以提供较多的成因信息,而且是评价金伯利岩含金刚石性的一级指示矿物和金刚石中较常见的包裹体矿物,因此在金刚石找矿过程中,铬铁矿(铬尖晶石)常作为一种非常重要的指示矿物。张安棣等^[23]在研究金刚石指示矿物特征时,将铬铁矿划分为12组,其中S1(无

钛贫铝富镁铬铁矿)、S2(含钛贫铝富镁铬铁矿)组铬铁矿($w(\text{Cr}_2\text{O}_3) > 58\%$)为金刚石矿的标型指示矿物。

苏北地区的基性-超基性岩中,除白露山岩体存在S1、S2组铬铁矿外,其余岩体均缺乏该类型铬铁矿,苏北金伯利岩中的铬铁矿 Cr_2O_3 含量普遍低于55%,缺乏标型铬铁矿。

松散物中,郯庐断裂带内的新沂城岗-王圩和泗洪梅花地区发现少量的S1、S2组铬铁矿,郯庐断裂带西侧未发现。

5 找矿方向探讨

苏北原生金刚石找矿工作与山东、辽宁相比,尚处于起步阶段,目前还未发现有价值的含矿岩体,因此工作目标是寻找含矿的金伯利岩或钾镁煌斑岩,找矿方法的选择和工作的布置也应围绕这一目标。

如前文所述,古生代是华北陆块含矿金伯利岩的主要时期,因此首要目标应是古生代的金伯利岩。对于古生代金伯利岩侵位的有利部位,郯庐断裂带内的城岗隆起是最有利地区,并且在城岗隆起上及其东南部,从第四系砂砾层中发现了大量的金刚石和标型指示矿物(G9、G10组镁铝榴石、高铬铬透辉石和S1、S2组铬铁矿)。因此城岗隆起上存在古生代含矿金伯利岩是可能的,该地区是今后找矿的重要靶区。

此外,郯庐断裂带西侧的白露山、寺山和圣庵等地的含角砾基性岩亦是值得关注的。这些地区虽受徐宿弧形构造的影响,很可能导致古生代岩浆活动被掩盖在地下,但当后期岩浆活动上侵时,如与早期的岩浆通道相吻合,将早期含矿金伯利岩捕掳携带至地表亦是可能的,其含矿性主要与所含角砾含矿以及含矿金伯利岩角砾的含矿性密切相关。

6 勘查方法评价

近几年,苏北金刚石找矿基本采用了同一套勘查方法组合,即:地质和物探面积性工作先行,优选异常或可疑岩体进行探矿工程揭露,然后采集人工重砂对目标岩体进行含矿性评价。这种勘查方法和思路虽然取得了一定成果,但仍存在局限性。

6.1 专项地质填图

专项地质填图作为先行军,在金刚石找矿中尤为重要,尤其是在基岩露头区,能够直接定位到金伯利岩或钾镁煌斑岩以及其他基性-超基性岩。苏北地区已发现的金伯利岩全部是在专项地质填图过程中发现的,即使在第四系覆盖区,仍有很多采石宕口、沟渠存在,适宜开展野外专项填图工作。因此,专项地质填图仍是金刚石找矿的基础手段。

6.2 物探专项工作

近几年,苏北金刚石找矿采用的较为有效的物探方法主要是磁法,尤其在郯庐断裂带西侧的徐州中部地区,由于大面积的沉积岩出露,与基性-超基性岩的磁性差异明显,因此该方法得到了广泛应用,也取得了非常好的效果。该方法与地质测量相结合,能够很好地识别基岩出露地区的岩体;在浅覆盖区,通过对磁异常进行钻孔验证,也能够较准确地揭露到异常体。此外,由于磁法反映的深度较浅,对于异常体的深部形态难以有效反映,因此常采用磁法-音频大地电磁测深的综合物探方法对其深部进行探测。

然而,由于物探的多解性,虽然对基性-超基性岩有很好的反映,但难以从中区分出金伯利岩或钾镁煌斑岩,目前在浅覆盖区通过钻探验证的磁异常大多由辉绿岩和橄榄玄武玢岩引起,尚未发现金伯利岩或钾镁煌斑岩。

近年来的金刚石找矿工作均集中在郯庐断裂带西侧,岩体与围岩的物性差异明显,因此通过物探能够较为有效地定位基性-超基性岩。而郯庐断裂带内,城岗变质岩、白垩系青山组火山岩、白垩系王氏组砂岩均有分布,岩石类型众多、物性复杂,采用物探手段寻找金伯利岩或钾镁煌斑岩的难度极大,还需进一步加强物探信息研究,合理选择相应的物探手段。

因此,对于苏北金刚石找矿来说,磁法和电法是较为有效的物探方法,但还需进一步加强物探方法的有效性试验以及金伯利岩或钾镁煌斑岩的解释等工作。

6.3 探矿工程

苏北金刚石找矿主要选择槽探和钻探作为岩体揭露和采样的重要手段,但在实际施工过程中存在问题:近几年施工的钻孔在钻遇异常体后,只要是基性-超基性岩,均将其穿透至围岩20~30m方才停钻。如前文所述,金刚石找矿目标主要是金

伯利岩、钾镁煌斑岩,如果钻遇的异常体不是目标岩体,则无需穿透岩体,可提前终孔,节省钻探工作量,将其用于其他异常的验证。由于物探资料具有多解性,许多磁异常并非由金伯利岩或钾镁煌斑岩引起,切记要与地质人员共同参与解释,钻探工作量不宜全部依赖于物探推断解释成果。此外,由于钻探费用较高,钻探宜以浅孔为主,深孔应慎重考虑。

因此,在探矿工程中,对于基岩浅覆盖地段或强风化的岩体,槽探是优先选择的有效手段;而钻探适宜浅覆盖区异常验证,其工作量在实际施工过程中可灵活运用,不应循规蹈矩。

6.4 采样测试

金金刚石找矿中主要选择岩矿鉴定和重砂鉴定等测试手段,前者可直接判断岩石类型和矿物组合,后者则用来评价岩体含矿性。由于金伯利岩或钾镁煌斑岩极易风化蚀变,很难采集到新鲜岩石,为岩矿鉴定带来了一定困难。此外,即使是含矿金伯利岩中的金刚石含量也很少,这就需要大体积样品才能具有代表性,但近年来采集的人工重砂样的重量一般只有50 kg左右,即使该岩体含金金刚石,也很可能因为采样过少而漏掉。与其他矿种不同,重砂鉴定目前作为金刚石含矿性评价的直接手段(选矿相当于大体积重砂鉴定),是整个工作最终成果的落脚点。目前,全国地质勘查单位真正能做金刚石重砂选矿鉴定样的单位极少,样品处理有一定难度。

因此,在今后金刚石找矿中,要注意从宏观到微观,加大人工重砂的采样体积,寻找合适的鉴定单位。

6.5 勘查方法选择

苏北原生金刚石找矿目标是寻找含矿的金伯利岩或钾镁煌斑岩,勘查方法的选择和工作的布置也应围绕这一目标。按照地质找矿“由已知到未知,由浅入深、由表及里”的一般原则,结合前述各类方法的适用性和局限性,总结出苏北原生金刚石勘查方法组合:

(1) 郟庐断裂带西侧基岩出露总体较好,分布有大面积的碳酸盐岩和碎屑岩,岩体与围岩物性差异较大。面上以专项地质测量和岩体剖面测量为基础,重点优选航磁、地磁异常,寻找金伯利岩或钾镁煌斑岩;在点上,采用地质+磁法+电法对目标岩体或异常体进行定位,地表以槽探揭露为主,验证性钻

孔应以浅钻为主,以期揭露金伯利岩或钾镁煌斑岩;配合大体积人工重砂样品,评价岩体含矿性。

(2) 郟庐断裂带内第四系分布广泛,基岩露头很差,碎屑岩、中-基性火山岩、基性-超基性脉岩、基底变质岩等均有分布,地质复杂程度极高。面上应以专项地质调查和水系重砂溯源为基础,结合以往航磁成果,优选异常靶区;在点上,采用地质+磁法+电法+重力对目标岩体或异常体进行大致定位,以浅钻进行异常验证,地表辅以槽探工程,以期发现金伯利岩或钾镁煌斑岩;采集大体积人工重砂样品,评价岩体含矿性。对于第四系覆盖区,物探应是主要的手段,因此需加强不同物探方法的验证性试验,选择合适的方法开展工作。

7 结论与建议

(1) 苏北金伯利岩岩石类型主要为青灰色或紫红色斑状金伯利岩和含角砾斑状金伯利岩,其岩浆活动上限为 (135.8 ± 4.3) Ma,结合以往该期次脉岩的年龄,总体应属于中生代-新生代。这与华北中生代-新生代金伯利岩岩浆活动一致,且缺乏标型指示矿物,含矿性较差。

(2) 郟庐断裂带于晚侏罗世-早白垩世开始活动,与古生代金伯利岩并没有成因联系,但其在伸展阶段控制发育的断陷红盆,可能使得带内的古生代金伯利岩被掩盖在白垩系之下。徐宿弧形构造发育时期涵盖了古生代岩浆活动时期,可能导致古生代金伯利岩被掩盖于推覆体之下。

(3) 苏北基性-超基性岩中,圣庵和寺山橄榄玄武玢岩中发现G9和G10组镁铝榴石,白露山岩体中发现了S1和S2组铬铁矿,这些指示矿物可能来自捕获的含矿金伯利岩。松散物中,郟庐断裂带内的新沂城岗-王圩和泗洪梅花地区发现了若干标型指示矿物,而郟庐断裂带西侧则未发现。

(4) 苏北原生金刚石找矿的首要目标为古生代的金伯利岩。郟庐断裂带内的城岗隆起是古生代含矿金伯利岩侵位的有利部位,是今后找矿的重要靶区;郟庐断裂带西侧的含角砾基性岩亦是值得关注的对象,但含矿性可能较差。

(5) 苏北金刚石找矿方法主要为:地质和物探面积性工作先行,优选异常或可疑岩体进行探矿工程揭露,然后采集人工重砂对目标岩体进行含矿性评价。应充分考虑工作区地质、地形等因素,根据

不同方法的适用性和局限性,重点加强物探验证性试验,合理搭配找矿方法组合。

致谢: 本文得到了江苏省地质调查研究院厉建华正高级工程师的细心指导,以及江苏省地质矿产局第五地质大队刘爱斌正高级工程师、钱静高级工程师和蔡承刚高级工程师的大力帮助,在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 施建斌,周琦忠,张琪,等. 苏北金刚石找矿简史及找矿方向探讨[J]. 华东地质,2017,38(S1):31-35.
Shi J B,Zhou Q Z,Zhang Q, et al. Brief history of diamond prospecting and discussion on prospecting direction in North Jiangsu[J]. East China Geol,2017,38(S1):31-35.
- [2] 周琦忠,施建斌,黄友波,等. 江苏徐州西村金伯利岩管地质特征及其找矿意义[J]. 地质通报,2019,38(1):152-162.
Zhou Q Z, Shi J B, Huang Y B, et al. Geological characteristics and prospecting significance of Kimberlite pipe in Xicun area of Xuzhou, Jiangsu Province[J]. Geol Bull China, 2019, 38(1): 152-162.
- [3] 黄友波,周琦忠,张琪,等. 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[J]. 地质通报,2019,38(1):132-142.
Huang Y B,Zhou Q Z,Zhang Q, et al. Geochemical feature of olivine basaltic porphyrite in Tashan area of Xuzhou, Jiangsu Province, and its relation to diamond origin[J]. Geol Bull China, 2019,38(1):132-142.
- [4] 周琦忠,张琪,冯学知,等. 江苏徐州白露山岩管地质特征及与金刚石成因关系探讨[J]. 地质学报,2020,94(9):2748-2762.
Zhou Q Z,Zhang Q,Feng X Z, et al. Geological characteristics of the Bailushan rock mass and its relationship with diamond genesis in Xuzhou, Jiangsu Province[J]. Acta Geol Sin, 2020, 94(9): 2748-2762.
- [5] 蔡逸涛,张洁,施建斌,等. 华北克拉通南缘碱性基性岩金刚石成因探讨——来自红外光谱的证据[J]. 地质学报,2020,94(9):2736-2747.
Cai Y T,Zhang J,Shi J B, et al. A discussion on the origin of basite type diamonds in the southern part of North China Craton: Evidences from FTIR[J]. Acta Geol Sin, 2020, 94(9): 2736-2747.
- [6] 周琦忠,张琪,冯学知,等. 徐州睢宁白露山岩体中的铬铁矿化学成分及金刚石的含矿性研究[J]. 中国地质调查,2020,7(6):35-42.
Zhou Q Z,Zhang Q,Feng X Z, et al. Chemical composition of the chromite and diamond potentiality of Bailushan rock mass in Suining area of Xuzhou[J]. Geol Surv China, 2020, 7(6): 35-42.
- [7] 蔡逸涛,陈国光,张洁,等. 安徽栏杆地区橄榄辉长岩地球化学特征及其与金刚石成矿的关系[J]. 资源调查与环境, 2014, 35(4): 245-253.
Cai Y T, Chen G G, Zhang J, et al. Geochemical Features of the Olivine-gabbros and their Relationship with Diamond-mineralization in the Langan area, Anhui Province[J]. Resour Surv Environ, 2014, 35(4): 245-253.
- [8] 路凤香,赵磊,邓晋福,等. 华北地台金伯利岩岩浆活动时代讨论[J]. 岩石学报,1995,11(4):365-374.
Lu F X,Zhao L,Deng J F, et al. The discussion on the ages of kimberlitic magma activity in North China platform[J]. Acta Petrol Sin, 1995, 11(4): 365-374.
- [9] 王登红,郑绵平,王成辉,等. 大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产调查工程进展与主要成果[J]. 中国地质调查,2019,6(6):1-11.
Wang D H,Zheng M P,Wang C H, et al. Progresses and main achievements on bulk lacking minerals and strategic emerging industry minerals survey project[J]. Geol Surv China, 2019, 6(6): 1-11.
- [10] 张培元. 论金刚石的成因和成矿作用及找矿方向[J]. 地质科技管理,1999,16(4):28-36.
Zhang P Y. The Discussion on the genesis, mineralization and prospecting direction of diamond[J]. Geol Technol Manage, 1999, 16(4): 28-36.
- [11] 路凤香,郑建平,邵济安,等. 华北东部中生代晚期—新生代软流圈上涌与岩石圈减薄[J]. 地学前缘,2006,13(2):86-92.
Lu F X,Zheng J P,Shao J A, et al. Asthenospheric upwelling and lithospheric thinning in late Cretaceous-Cenozoic in eastern North China[J]. Earth Sci Front, 2006, 13(2): 86-92.
- [12] 郑建平,路凤香, O'Reilly S Y, 等. 华北地台东部古生代与新生代岩石圈地幔特征及其演化[J]. 地质学报,1999,73(1):47-56.
Zheng J P,Lu F X,O'Reilly S Y, et al. Comparison between palaeozoic and Cenozoic lithospheric mantle in the eastern part of the North China block: With a discussion of mantle evolution[J]. Acta Geol Sin, 1999, 73(1): 47-56.
- [13] 牛漫兰. 郯庐断裂带中南段岩浆活动与深部过程[D]. 合肥: 合肥工业大学,2001.
Niu M L. Magmatism and Deep Processes in the Central and Southern Segment of the Tanlu Fault Zone[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2001.
- [14] Xu J W. The Tancheng-Lujiang Wrench Fault System[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Inc., 1993: 1-7.
- [15] Xu J W, Zhu G. Tectonic models of the Tan-Lu fault zone, eastern China[J]. Int Geol Rev, 1994, 36(8): 771-784.
- [16] Yin A, Nie S Y. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia[J]. Tectonics, 1993, 12(4): 801-813.
- [17] 徐学思. 初论郯庐断裂的平移及演化[J]. 中国区域地质, 1985, 6(4): 37-42.
Xu X S. Horizontal displacement and evolution of the Tancheng-

- Lujiang fracture[J]. Reg Geol China, 1985, 6(4): 37-42.
- [18] 宋瑞祥. 中国金刚石矿床专论——中国金刚石矿找矿与开发[M]. 北京:地质出版社, 2013: 12-225.
- Song R X. Monograph on China's Diamond Deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 12-225.
- [19] 江苏省地质矿产局第五地质大队区调分队. (台儿庄幅(南1/2)) I-50-56-A 岔河幅 I-50-56-B 汴塘幅 I-50-56-C 邳城幅 I-50-56-D 八义集幅 I-50-68-A 邳县幅 I-50-68-B 双沟幅 I-50-68-C 古邳镇幅 I-50-68-D 1:5万区域地质调查报告(地质、矿产部分)[R]. 徐州:江苏省地矿局第5地质大队, 1990.
- NO. 5 Geological Team of Jiangsu Geology and Mineral Bureau. 1:50 000 geological and mineral survey report of Taierzhuang Area (South 1/2), Chahe Area, Biantang Area, Picheng Area, Bayiji Area, Pixian Area, Shuanggou Area, Gupi Area[R]. Xuzhou: NO. 5 Geological Team of Jiangsu Geology and Mineral Bureau, 1990.
- [20] 周秀仲, 黄蕴慧, 秦淑英, 等. 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, 10(3): 252-264.
- Zhou X Z, Huang Y H, Qin S Y, et al. Types, Typomorphic characteristics of garnet from Kimberlites in Shandong and Liaoning province and its relationship with diamond[J]. Acta Petrol Mineral, 1991, 10(3): 252-264.
- [21] 赵秀芳. 山东蒙阴县西峪矿区深部与外围金刚石指示矿物——利用金刚石指示矿物预测金伯利岩的含矿性[J]. 地质通报, 2019, 38(1): 121-131.
- Zhao X F. A study of diamond indicative minerals in the depth and periphery of Xiyu, Mengyin County, Shandong Province: Metallogenic properties of kimberlite predicted by diamond indicative minerals[J]. Geol Bull China, 2019, 38(1): 121-131.
- [22] Dawson J B, Stephens W E. Statistical classification of garnets from Kimberlite and associated xenoliths[J]. J Geol, 1975, 83(5): 589-607.
- [23] 张安棣. 金刚石找矿指示矿物研究及数据库[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1991: 1-162.
- Zhang A D. Diamond Prospecting Indicative Mineral Research and Database[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1991: 1-162.

The discussion of primary diamonds exploration in Northern Jiangsu Province

ZHANG Qi, ZHOU Qizhong, WANG Bo, WANG Guoqiang, FENG Xuezhi, LUO Yue
(No. 5 Geological Team of Jiangsu Geology and Mineral Bureau, Jiangsu Xuzhou 221004, China)

Abstract: The second round of diamond prospecting in Northern Jiangsu Province has lasted 8 years, without discovery of ore-bearing kimberlite or diamond deposits. Based on the actual prospecting in Northern Jiangsu and combined with the latest diamond ore-forming theory and advance, the authors in this paper put forward and discuss several issues restricting the prospecting of primary diamonds in Northern Jiangsu to further explore the prospecting direction. The results show the primary target of primary diamond prospecting in Northern Jiangsu Province is Paleozoic kimberlite, which is located in Western Tanlu fault zone. The kimberlite of this period may be covered under the nappe due to the existence of the Xusu arc structure. Although there is no genetic relationship between Tanlu fault zone and Paleozoic kimberlite rock, the rifted red basin controlled by its development in the extension stage may cause the Paleozoic kimberlite to be covered under the Cretaceous. The future prospecting direction should focus on the Chenggang uplift in the Tan-Lu fault zone, and the breccia-bearing basic rocks on the west side of the Tanlu fault zone are also worthy of attention. During the ore prospecting and exploration, the geological and topographical conditions of the work area, the adaptability and limitations should be fully considered to select the combination of exploration methods according to local conditions.

Keywords: Northern Jiangsu Province; primary diamond prospecting; Kimberlite; structure; prospecting direction

(责任编辑: 沈效群)