

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

黄友波¹, 周琦忠¹, 张琪¹, 冯学知¹, 王国强¹, 张凤鸣¹, 蔡逸涛²

HUANG Youbo¹, ZHOU Qizhong¹, ZHANG Qi¹, FENG Xuezhi¹, WANG Guoqiang¹, ZHANG Fengming¹, CAI Yitao²

1. 江苏省地质矿产局第五地质大队, 江苏 徐州 221004;

2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016

1. No. 5 Geological Party, Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources, Xuzhou 221004, Jiangsu, China;

2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China

摘要:通过研究徐州塔山地区橄榄玄武玢岩的地球化学特征,对其岩石成因及构造环境进行判别,并进一步对其金刚石成矿前景进行探讨。结果表明,橄榄玄武玢岩属于大陆板内玄武岩,总体上略富集轻稀土元素,是在板内拉张构造背景下由石榴子石相的富集地幔经不同程度部分熔融形成的,且在岩浆结晶过程中存在一定程度的斜长石堆晶作用。其所含微粒金刚石与安徽栏杆金刚石相似,显示出金刚石生长初期的特点,应为幔源捕获成因。与金伯利岩相比,橄榄玄武玢岩在地球化学特征方面存在明显差异,整体表现为古近纪伸展期玄武岩浆的特征,不具备携带大量深源包体的条件,难以形成原生金刚石矿床。

关键词:徐州塔山;橄榄玄武玢岩;地球化学特征;金刚石;成因关系

中图分类号:P619.24¹;P588.13⁴ **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2019)01-0132-11

Huang Y B, Zhou Q Z, Zhang Q, Feng X Z, Wang G Q, Zhang F M, Cai Y T. Geochemical feature of olivine basaltic porphyrite in Tashan area of Xuzhou, Jiangsu Province, and its relation to diamond origin. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(1):132-142

Abstract: The petrogenesis and tectonic environment of olivine basaltic porphyrites were judged according to their geochemical characteristics in Tashan area of Xuzhou. Then the exploration prospect of diamond was discussed. The result shows that they are plotted in the intraplate tholeiitic series and are slightly enriched in LREE. They were formed by partial melting of the enriched mantle of the garnet facies through varying degrees of partial melting in the intraplate extensional tectonic background. Besides, there was a certain degree of plagioclase intergranular effect in the process of magma crystallization. The particle diamond it contains is similar to that of the Lanling area in Anhui, which shows the characteristics of the early growth of diamond. The origin should be the capture of the mantle source. In terms of geochemical characteristics, they are obvious different from the kimberlite. They had characteristics of basaltic magma in the extensional period of Paleogene and did not have the conditions to carry a large number of deep source inclusions. Therefore, it was unfavorable to form a primary diamond deposit.

Key words: Tashan area of Xuzhou; olivine basaltic porphyrite; geochemical characteristics; diamond; origin relation

近年来,江苏省地质矿产局第五地质大队在开展原生金刚石找矿过程中,在基性-超基性岩中选

获了几颗原生金刚石,包括徐州塔山地区大李庄橄榄玄武玢岩中的1颗微粒金刚石和白露山橄榄玄武

收稿日期:2018-06-21;修订日期:2018-08-15

资助项目:江苏省地质勘查基金项目《江苏省徐州市塔山地区原生矿地质普查》(编号:苏财建[2014]278号)和中国地质调查局项目《华北和扬子地区金刚石矿产调查》(编号:DD20160059)

作者简介:黄友波(1990-),男,学士,助理工程师,从事地质矿产勘查工作。E-mail:dzwdzqz@foxmail.com

玢岩中的3颗金刚石,这在一定程度上推动了该区的金刚石原生矿找矿工作。徐州塔山地区位于徐州北部,基性-超基性岩类型较多,是不同时代岩浆活动的产物。前人对本区的基性-超基性岩研究较多,在岩石特征、地球化学特征、岩石背景等方面取得了重要的成果,但对于本区橄榄玄武玢岩的金刚石含矿性研究程度较低^[1-4],且对于其与金刚石的成因关系缺乏研究。本文通过研究徐州塔山地区橄榄玄武玢岩的地球化学特征,对其岩石成因及构造环境进行判别,并对其与金刚石成因的关系进行探讨。

1 区域地质背景

徐州塔山地区位于华北陆块区(Ⅰ1)—胶东古陆块(Ⅱ1)—鲁南被动陆缘与陆表海盆地(Ⅲ1)—徐淮陆表海盆地(Ⅳ2)—徐州-宿县弧形断褶带的北东段,东距郯庐断裂带约45km。区域上具有古老的泰山岩群变质结晶基底,为华北地台特有的太古宙以中基性喷出岩为主的中深度变质岩系,新元古代-新生代地层均有发育,且以新元古代地层保存较完好^[3,5]。

区域地质构造线总体为NE向,表现为纵向褶

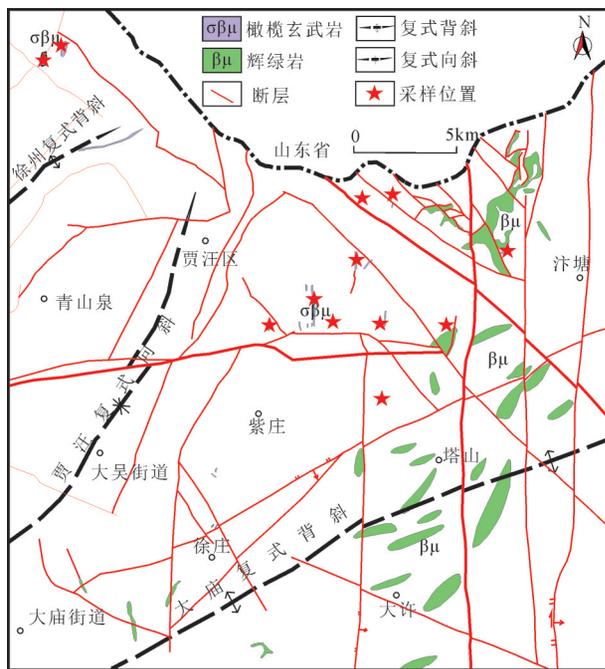


图1 徐州塔山地区岩浆岩分布

Fig. 1 The distribution of magmatic rocks in Tashan area of Xuzhou

皱、断裂。区域褶皱由西向东依次有江庄复背斜、贾汪复向斜、艾山-大庙复背斜,轴向由北东向南西呈弧形。区内断裂构造主要有NE向、NW向、NNE向、近EW向,断裂构造多期活动性明显(图1)。

区域岩浆活动不甚强烈,种类少、分布局限,侵入岩主要为新元古代的辉绿岩,多呈岩床状侵入于震旦系中;中生代闪长岩类主要分布于研究区西北部的利国一带;中生代火山岩为中生代早白垩世青山旋回的喷发,属安山岩-安山玄武岩-玄武岩类,分布于NE—NNE向断陷槽地中;中、新生代橄榄玄武玢岩、煌斑岩主要受NNE向断裂控制,呈脉状产出。

2 岩体及岩石学特征

徐州塔山地区橄榄玄武玢岩多分布于贾汪区中东部的大洞山、阚山、芦山等地,侵位地层为震旦系、寒武系和奥陶系,均呈脉状,系深部玄武质岩浆沿着围岩的构造裂隙上侵充填凝固而成,属超浅成岩相。规模较小,长度由几十米至几百米,宽0.5~15m,多受NNE向构造控制并斜切地层走向,接触界线清楚,围岩蚀变较弱。岩脉中发现少量角砾,成分为辉石岩、基底变质岩和围岩角砾。20世纪八九十年代,江苏第五地质大队对徐州地区橄榄玄武玢岩进行了K-Ar年龄测定,结果显示其形成于0.49~1.24Ma,属于燕山晚期—喜马拉雅期岩浆活动的产物,结合前人研究^[4,6],其形成年代应主要处于新生代。

岩石呈暗绿色至黑色,风化后颜色变浅,为浅灰绿色及灰黄褐色。镜下显示具斑状结构,基质为间粒结构或似辉绿结构(图2),气孔-杏仁状构造。斑晶矿物主要是斜长石、橄榄石假象和单斜辉石,斜长石呈半自形长板状,轻微皂石化,有的可隐约见环带构造,为拉长石;橄榄石呈自形-半自形柱状、粒状,具皂石化、碳酸盐化等呈假象,为贵橄榄石;单斜辉石呈紫褐色、半自形柱状,为含钛辉石。基质由斜长石、单斜辉石、橄榄石假象、不透明矿物、黑云母组成。见少量杏仁体,呈近椭圆状,直径2.0~10mm,被碳酸盐、褐铁矿等充填。岩石中共伴生重矿物成分比较简单,主要为磁铁矿、铁尖晶石、锆石、磷灰石、黄铁矿、金红石,可见少量镁铝榴石、铬铁矿甚至铬透辉石等深源矿物,其中镁铝榴石呈紫红色-橙红色、浑圆粒状,铬铁矿呈黑色、半自形次浑圆粒状,铬透辉石呈嫩绿色、次棱角块状,这些

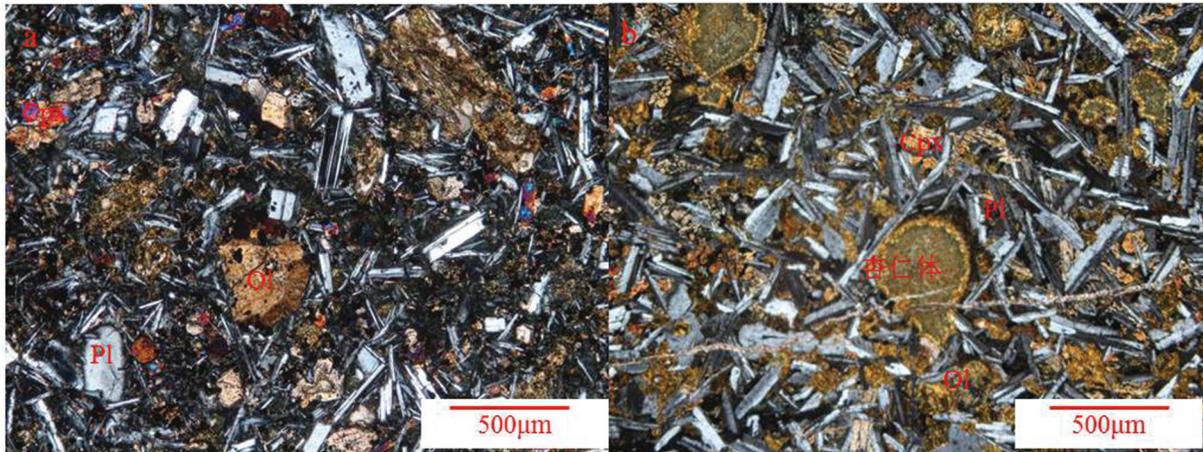


图2 徐州塔山地区橄榄玄武玢岩镜下特征

Fig. 2 Microscopic features of magmatic rocks in Tashan area of Xuzhou

a—斑状结构;b—杏仁体构造;Ol—橄榄石;Cpx—单斜辉石;Pl—斜长石

深源指示矿物证明了深幔源物质的存在。

3 样品采集与分析方法

本次研究的橄榄玄武玢岩样品主要产自徐州塔山地区的地表和钻孔岩心,具体采样位置见图1、表1。由于采样条件的限制,很难采集到新鲜岩石,样品普遍存在一定程度的蚀变现象。样品元素分析在河北省区域地质调查研究所实验室完成。主量元素采用Axios^{max}X射线荧光光谱仪测定,测试误差小于2%,其中FeO含量通过湿化学方法测定。微量元素采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行分析,测定元素含量高于 100×10^{-6} 时,分析误差小于5%,测定含量低于 10×10^{-6} 的元素时,分析误差小于8%,Cr、Ni、V和Sc元素的分析误差在10%左右。测试结果见表1、表2。

4 地球化学特征

4.1 主量元素

研究区橄榄玄武玢岩样品的主量元素分析结果(表1)表明,SiO₂含量在41.46%~49.50%之间,平均为46.07%,整体呈基性;Al₂O₃变化范围为14.47%~21.17%;全碱含量普遍较高,平均为4.52%;MgO为4.73%~7.48%,TiO₂为1.22%~2.24%。烧失量差异较大,为3.17%~11.98%,表明岩浆就位以后岩石可能经历了一定程度的后期蚀变作用,这与镜下观察结果一致。Mg[#]值介于18.77~64.63之间,平均为

37.23,明显低于原生玄武岩(68~75)和碱性玄武岩浆(63~73);分异指数DI在27.47~49.38之间,平均为36.41,略高于原生玄武岩浆(35);固结指数SI在13.87~30.72之间,平均为20.83,明显低于原生玄武岩浆值(40)^[7],这些均反映岩浆分异程度较高的特征。

TAS图解(图3-a)显示,本区橄榄玄武玢岩大多落入粗面玄武岩和玄武岩区域,碱性和亚碱性岩均有发育。由于TAS分类方案适用于贫钾、低镁的新鲜岩石,因此对于已蚀变的岩石其判别结果可能会产生误差,鉴于高场强元素和稀土元素在弱蚀变过程中基本不发生迁移,本文选择适用于弱蚀变岩石的Zr/TiO₂-Nb/Y图解对橄榄玄武玢岩做进一步判别。在Zr/TiO₂-Nb/Y判别图(图3-b)上,样品点大多落入碱性玄武岩区域,少数落入亚碱性玄武岩区域,其碱性程度与东部玄武岩平均偏碱性一致,而与东部辉绿岩、辉长岩平均偏钙碱性有所差异^[9]。

4.2 微量元素

本区橄榄玄武玢岩的稀土元素分析结果显示(表2;图4-a);其稀土元素总量 Σ REE较高,介于 60.03×10^{-6} ~ 200.05×10^{-6} 之间,平均为 139.8×10^{-6} ;LREE/HREE值介于3.99~9.74之间,La_N/Yb_N为3.56~11.67,δEu平均为1.17。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(4-a)上,样品表现出较一致的缓右倾型配分模式,总体呈现轻稀土元素略富集、轻重稀土元素分馏程度略高的特征,Eu具有一定的正异常,表明岩石在岩浆结晶过程中存在一定程度

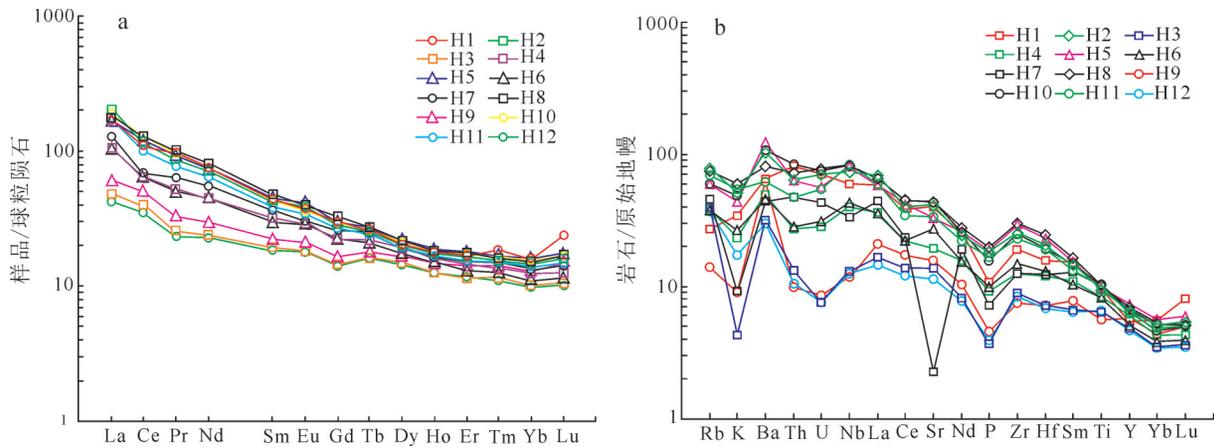


图4 橄榄玄武玢岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive-mantle-normalized trace element spidergram(b) of olivine basaltic porphyrite

Ba 相对富集, Sr 整体略富集, K 亏损明显, 其中 H7 样品的 Sr 呈严重亏损状态, 可能由于后期蚀变作用较强, 导致 Sr 发生了迁移; 高场强元素 (HFSE) Nb、La、Nd 略富集, Ce、P、Th、U、Zr 元素明显亏损。在分离结晶过程中, Sr 和 Eu 倾向进入斜长石矿物晶格中, 因此两者总体显示较一致的正异常特征。高场强元素 Zr、Hf 等在蚀变过程中具有良好的稳定性, 可以指示岩石成因。研究区橄榄玄武玢岩 Zr、Hf、Nb、Ta 丰度值与板内拉斑玄武岩和碱性玄武岩接近 ($Zr=149\times 10^{-6}\sim 213\times 10^{-6}$ 、 $Hf=3.44\times 10^{-6}\sim 6.36\times 10^{-6}$ 、 $Nb=13\times 10^{-6}\sim 84\times 10^{-6}$), 而与 MORB 玄武岩 ($Zr=90\times 10^{-6}\sim 96\times 10^{-6}$ 、 $Hf=2.4\times 10^{-6}\sim 2.93\times 10^{-6}$ 、 $Nb=2.5\times 10^{-6}$) 和火山弧玄武岩 ($Zr=40\times 10^{-6}\sim 71\times 10^{-6}$ 、 $Hf=1.17\times 10^{-6}\sim 2.23\times 10^{-6}$) 有明显区别。样品中 Ni 的丰度范围为 $34.9\times 10^{-6}\sim 163\times 10^{-6}$, Cr 为 $26\times 10^{-6}\sim 248\times 10^{-6}$, 均明显低于原始碱性玄武岩的平均丰度 (Ni 为 290×10^{-6} , Cr 为 380×10^{-6})^[7], 表明研究区橄榄玄武玢岩为原始岩浆分异作用的产物。

4.3 成因与构造背景

根据元素在不同矿物中的相容性, 伴随结晶作用的进行, 元素的丰度会随之变化, 由于地壳与地幔在成分上存在差异, 所以常用对同化混染作用较灵敏的元素比值探讨是否具有同化混染作用。一般而言, 地壳物质具有低 Nb、高 Th 的特点。本区橄榄玄武玢岩的 Nb^* 异常值 ($Nb^*=2Nb_N/(K_N+La_N)$) 多大于 1, 平均值为 1.26, 整体表现为 Nb 富集, 表明

基性岩浆在上升过程中基本未受陆壳的混染。原始地幔标准化 Th_N/Nb_N 值和 Nb/La 值是判别地壳混染作用 2 个可靠的微量元素指标^[11], $Th_N/Nb_N-Nb/La$ 图解 (图 5) 表明, 研究区橄榄玄武玢岩可能在侵入过程中经历了较低程度的地壳混染。橄榄玄武玢岩脉为基性岩浆快速侵位至浅部的产物^[2], 野外调查发现其与围岩的交代作用较弱, 微量元素也表明其受到地壳混染的程度较弱, 因此地壳混染不是影响岩石化学特征的主要机制。

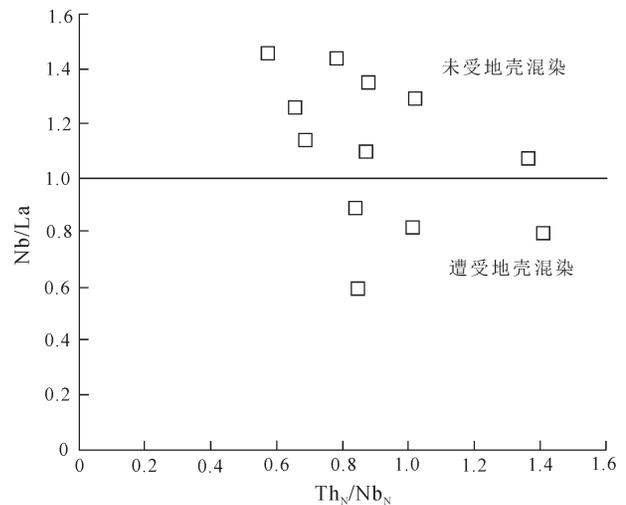


图5 橄榄玄武玢岩 $Th_N/Nb_N-Nb/La$ 图解(底图据参考文献[11])

Fig. 5 $Th_N/Nb_N-Nb/La$ diagram of olivine basaltic porphyrite

表 2 橄榄玄武玢岩微量元素数据

Table 2 Trace element data of olivine basaltic porphyrite

样号	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
地点	二成山	官庄	大洞山	大洞山	芦山	阚山	柴窝村	马头山	大荆山	二成山	柴窝村	葛湖村
岩石名称	杏仁状 橄榄玄 武玢岩	橄榄玄 武玢岩	橄榄玄 武玢岩	橄榄玄 武玢岩	橄榄玄 武玢岩	杏仁状 橄榄玄 武玢岩	橄榄玄 武玢岩	橄榄玄 武玢岩	杏仁状 橄榄玄 武玢岩	杏仁状 橄榄玄 武玢岩	碳酸盐 化碱性 玄武岩	杏仁状 橄榄玄 武玢岩
	10 ⁻⁶											
Li	13.3	25.7	9.39	15.7	19	16.1	32.8	26.4	10.6	14.8	26.3	9.31
Be	2.49	2.68	0.64	1.14	2.66	1.15	1.43	3.2	0.61	2.73	2.34	0.54
Sc	30.8	13.4	19.5	17.1	12.7	18	20.1	11.3	21	17	11.3	17.8
V	152	118	179	166	112	174	150	106	183	170	95.1	172
Cr	248	74.5	160	149	29.9	108	144	20.2	121	119	26	99.7
Co	48.4	32.3	41.7	48.1	34.8	35.6	59.4	29.8	42	41.2	33.6	36.4
Ni	163	65.3	144	120	42.5	111	162	34.9	134	97.2	37.2	111
Cu	97.8	62.9	98	91.8	43.5	75.2	92	36.9	104	51.8	39.6	90.2
Zn	80	101	116	125	109	122	130	100	113	102	94.3	99.2
Rb	17.4	50.7	24.7	24.6	38.1	23.8	28.9	47.3	8.9	37.7	43.8	23.3
Sr	850	882	288	411	690	578	47.6	935	331	907	715	241
Zr	211	289	99.5	140	328	165	141	334	83.2	277	258	94.2
Nb	42.4	52.3	9.26	28.4	57.5	30.9	24.2	59.1	8.46	58.3	59.2	8.9
Ba	455	722	221	342	856	321	307	563	429	758	429	209
Hf	4.87	6.35	2.21	3.73	7.14	4.03	3.77	7.46	2.23	6.03	5.87	2.11
Ta	3.19	3.67	0.5	1.56	4.06	1.66	1.39	4.37	0.46	3.44	3.41	0.49
Pb	4.58	4.27	1.63	3.45	4.03	1.83	7.02	4.83	1.79	5.19	3.49	4.17
Bi	0.05	0.01	0.001	0.02	0.01	0.01	0.11	0.02	0.01	0.02	0.002	0.01
Th	6.89	5.45	1.12	2.33	5.39	2.41	4.06	6.18	0.85	7.09	4.05	0.89
U	1.47	1.49	0.16	0.6	1.17	0.65	0.91	1.63	0.18	1.56	1.14	0.16
La	39.8	47.7	11.4	25	39.9	24.6	30.4	43.9	14.4	45.2	40.7	10
Ce	67.9	70.6	24.4	39.2	75	39.5	41.6	79.1	30.9	79.4	61.3	21.3
Pr	9.07	8.21	2.45	4.94	8.79	4.81	6	9.58	3.12	9.15	7.35	2.23
Nd	34.9	33.3	11.2	21.1	34.6	20.8	25.7	37.8	14	35.1	29.9	10.6
Sm	6.65	6.44	2.94	4.86	6.87	4.62	5.64	7.2	3.45	6.48	5.87	2.84
Eu	2.19	2.23	1.06	1.67	2.4	1.67	1.78	2.33	1.24	2.1	1.98	1.03
Gd	6.05	5.76	2.96	4.58	6.18	4.59	5.3	6.72	3.36	6.02	5.52	2.92
Tb	0.98	0.95	0.6	0.83	1.02	0.78	0.95	1.01	0.67	0.92	0.9	0.6
Dy	5.21	5.09	3.75	4.86	5.6	4.42	5.47	5.44	4.22	4.79	4.88	3.66
Ho	1.02	0.99	0.72	0.91	1.07	0.85	1.02	1.02	0.84	0.93	0.95	0.72
Er	2.74	2.71	1.89	2.38	2.93	2.17	2.82	2.89	2.32	2.52	2.52	1.92
Tm	0.47	0.4	0.29	0.35	0.43	0.32	0.41	0.42	0.36	0.38	0.38	0.28
Yb	2.72	2.5	1.72	2.11	2.76	1.89	2.53	2.61	2.18	2.3	2.36	1.67
Lu	0.6	0.4	0.27	0.32	0.44	0.29	0.38	0.43	0.36	0.36	0.37	0.26
Y	24.4	29.6	21.9	26.9	33.1	23.1	30.2	32	25.9	28.4	28.4	21.3
ΣREE	180.3	187.28	65.65	113.11	187.99	111.31	130	200.45	81.42	195.65	164.98	60.03
LREE	160.51	168.48	53.45	96.77	167.56	96	111.12	179.91	67.11	177.43	147.1	48
HREE	19.79	18.8	12.2	16.34	20.43	15.31	18.88	20.54	14.31	18.22	17.88	12.03
LREE/HREE	8.11	8.96	4.38	5.92	8.20	6.27	5.89	8.76	4.69	9.74	8.23	3.99
La _N /Yb _N	8.69	11.33	3.94	7.03	8.58	7.73	7.13	9.99	3.92	11.67	10.24	3.56
δEu	1.14	1.20	1.20	1.17	1.21	1.21	1.08	1.11	1.21	1.11	1.15	1.19

主量元素 Harker 图解(图 6)显示,主量元素含量与 MgO 含量的关系较复杂,相关性不明显,可能是由于成岩后的蚀变作用导致元素发生了迁移,其中 TiO₂ 含量较一般基性岩略高,可能暗示源自软流圈的流体在一定程度上参与了岩浆活动。在不相容元素和 La 的关系图(图 7)中, Sr、Zr、Ce、Nd、Nb 等与 La 均有较好的正相关关系,表明研究区橄榄玄武玢岩是由成分均一的地幔源区岩浆经不同程度的部分熔融形成的^[12]。

根据 Treuil 等(1975)的研究成果,分离结晶作用和部分熔融作用可以用 La-La/Sm 图解来判别,前者表现为水平线,后者则具有一定的斜率^[6,13]。La-La/Sm 图解(图 8-a)显示两者呈明显的正相关性,说明研究区橄榄玄武岩的形成主要受部分熔融作用的影响。La/Sm 与 Sm/Yb 值受分离结晶作用影响较小,用这 2 个比值可以了解岩浆源区性质和部分熔融程度^[10]。La/Sm-Sm/Yb 判别图(图 8-b)显示,研究区橄榄玄武玢岩源区是由接近原始地幔成分的石榴子石二辉橄榄岩低程度熔融形成的。同时,样品的 LREE 和 La/Yb 值较高,而 HREE 丰度较低,也佐证了源区有富含 HREE 的石榴子石残留。

通过与各主要化学容库的不相容元素比值进行对比(表 3),研究区橄榄玄武玢岩的不相容元素

比值中 Ba/Th 和 Ba/La 值较高,各元素比值范围与 EM I-OIB(I 型富集地幔-洋岛玄武岩)基本一致,与其他差异较大,表明其与 EM I-OIB 可能具有相似的岩浆来源,均来自 I 型富集地幔。

Zr、Y、Nb、Ti 等为不活泼元素,在岩浆演化过程中能保持一定的连续性,不易受后期地质作用的干扰,因此可用来有效地判断岩石产出的大地构造背景。微量元素 Zr-Zr/Y 图解(图 9)和 Ti/100-Zr-Y×3 图解(图 10-a)均显示样品点大多落入板内环境,在 Zr-Nb-Y 判别图解(图 10-b)上,样品点大多落入 A1 和 A2 区,表明本区橄榄玄武玢岩形成于板内环境,属板内碱性玄武岩或拉斑玄武岩,为板内快速拉张的产物。

古近纪,中国东部整体处于区域性伸展期,在太平洋板块的高角度俯冲下,中国东部软流圈上涌,使陆内岩石圈上拱拉张,地幔岩在减压作用下熔点降低,发生部分熔融,在伸展强烈的地区出现了玄武岩的喷发^[12]。因此,笔者认为,研究区橄榄玄武玢岩可能为古近纪板内拉张、软流圈上涌构造背景下富集地幔源区岩浆部分熔融的产物。

5 金刚石成因关系

以往认为,金刚石母岩类型主要为金伯利岩和

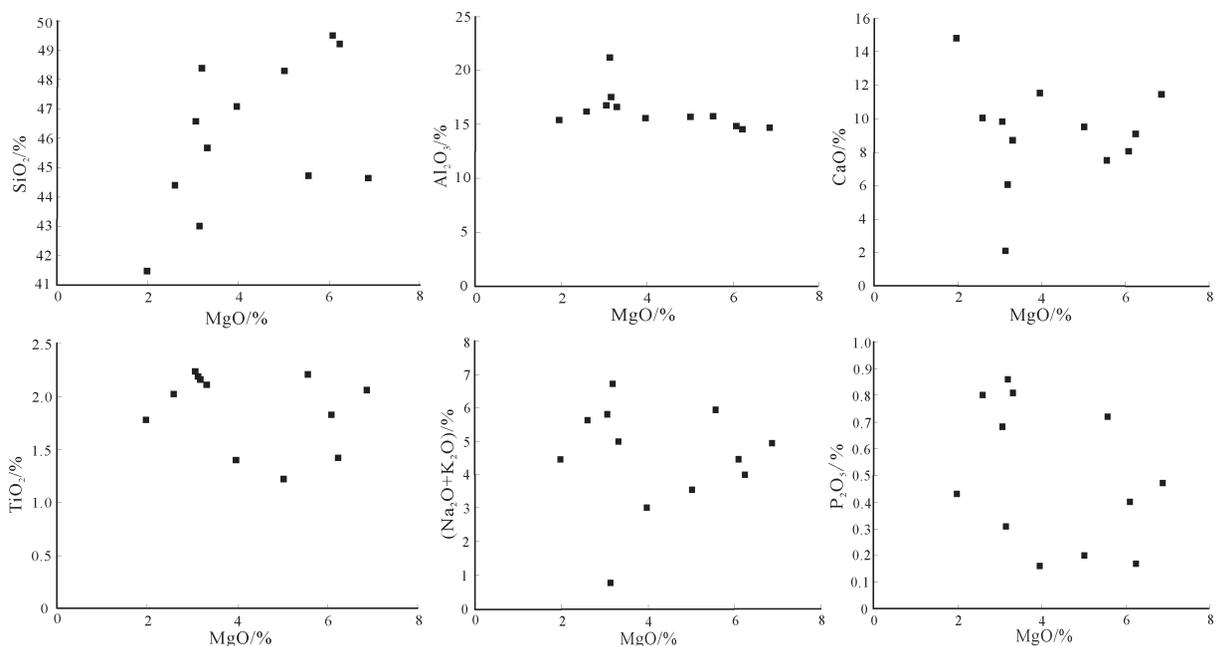


图 6 橄榄玄武玢岩主量元素 Harker 图解

Fig. 6 Harker diagrams of main element in olivine basaltic porphyrite

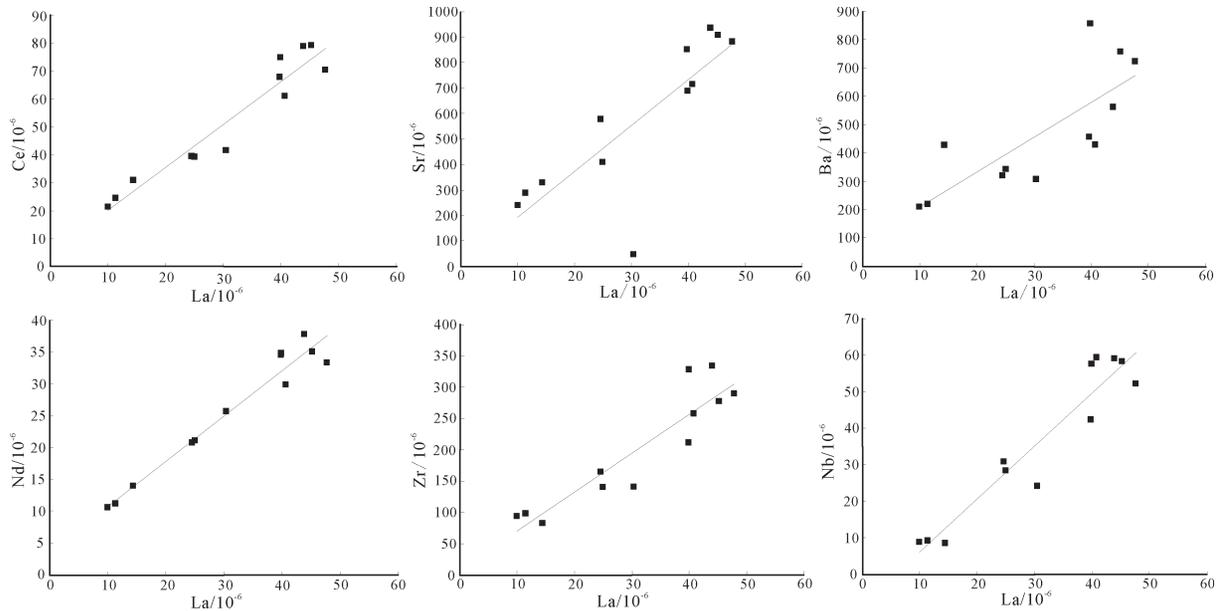


图 7 橄榄玄武玢岩不相容元素与 La 关系图

Fig. 7 Correlation between incompatible elements and La of olivine basaltic porphyrite

钾镁煌斑岩,但随着金刚石找矿成果和研究的突破,陆续在榴辉岩、蛇绿岩套、碱性超基性(火山)杂岩、碱性超基性煌斑岩、橄榄岩类等其他类型的岩石中也找到了金刚石,这些都证实金伯利岩和钾镁煌斑岩并不是金刚石的唯一成矿母岩^[7]。但目前具有经济意义的金刚石矿床母岩类型均为金伯利岩和钾镁煌斑岩,其他岩石中虽也含有金刚石,但一般难以成矿^[16]。

从主量元素看,金伯利岩具有低 SiO₂、高 MgO 的特征,且烧失量较高,反映了深部来源且富含挥发分的特征。橄榄玄武玢岩在化学成分上表现出较典型的超浅成基性侵入岩特征,差异较明显。在含金刚石母岩的含矿性判别三角图(图 11)上,橄榄玄武玢岩大多落入基性岩区域,与金伯利岩有明显差异。稀土元素方面,橄榄玄武玢岩和金伯利岩均表现为轻稀土元素富集、重稀土元素亏损、Eu 正异

表 3 橄榄玄武玢岩和主要化学容库不相容元素比值

Table 3 Incompatible elements ratio of olivine basaltic porphyrite and main chemical storage

元素比值	E-MORB	PM	N-MORB	CC	HIMU~OIB	EM I ~OIB	EM II ~OIB	塔山橄榄玄武玢岩	
								比值范围	平均值
Zr/Nb	8.57	14.80	30.00	16.20	5.5~27	3.5~13.1	4.4~7.8	4.36~10.75	6.52
La/Nb	0.75	0.94	1.07	2.20	0.64~0.82	0.78~1.32	0.79~1.19	0.69~1.7	0.98
Ba/Nb	8.97	9.00	4.30	54.00	4.70~6.90	9.1~23.4	6.4~13.4	7.25~23.87	13.79
Ba/Th	72.20	77.00	60.00	124.00	39~85	80~204	57~105	66.04~234.83	131.73
Rb/Nb	0.74	0.91	0.36	4.70	0.3~0.43	0.69~1.23	0.58~0.87	0.41~2.67	1.12
K/Nb	239.30	323.00	296.00	1341.00	66~187	207~523	203~378	94.34~485.03	225.68
Th/Nb	0.12	0.12	0.07	0.44	0.07~0.12	0.09~0.13	0.1~0.17	0.07~0.17	0.11
Th/La	0.16	0.13	0.07	0.20	0.16~10	0.09~0.15	0.11~0.18	0.06~0.17	0.12
Ba/La	11.90	9.60	4.00	25.00	6.2~9.36	11.3~19.1	7.3~13.5	10.10~21.45	15.02

注:数据均据参考文献[13-15];E-MORB—富集型洋中脊玄武岩;PM—原始地幔;N-MORB—亏损型洋中脊玄武岩;CC—大陆地壳;HIMU-OIB—高U/Pb值地幔-洋岛玄武岩;EM I -OIB— I 型富集地幔-洋岛玄武岩;EM II -OIB— II 型富集地幔-洋岛玄武岩

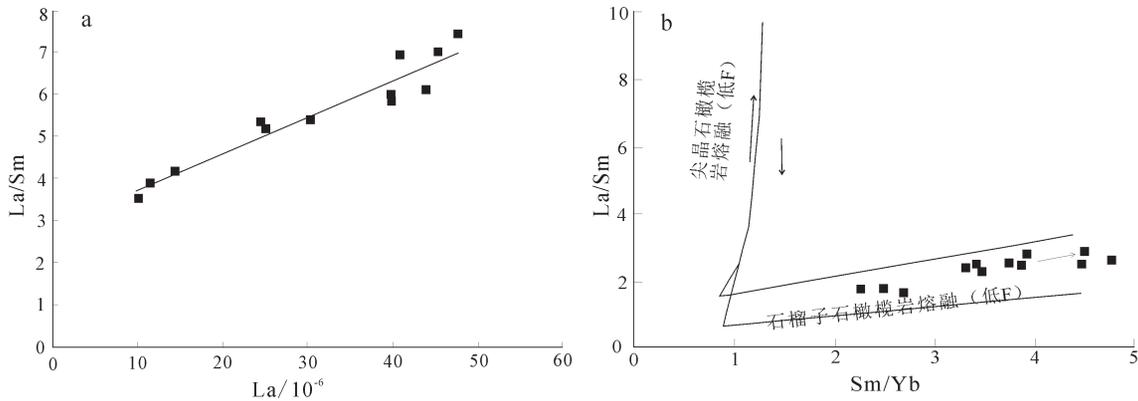


图8 橄榄玄武玢岩La-La/Sm(a,底图据参考文献[13])和Sm/Yb-La/Sm图解(b,底图据参考文献[10])

Fig. 8 La-La/Sm(a) and Sm/Yb-La/Sm (b) diagrams of olivine basaltic porphyrite

常不明显的特征,但金伯利岩的轻、重稀土元素分馏作用更加明显^[16]。微量元素方面,橄榄玄武玢岩Cr、Ni、Co等高温高压元素含量均比金伯利岩低,说明其深源矿物含量较少,反映其来源深度比金伯利岩浅的特征。总体看,研究区橄榄玄武玢岩地球化学特征与金伯利岩存在较明显的差异,也反映本区橄榄玄武玢岩岩浆成因和来源与金伯利岩存在明显不同。

目前,对于金刚石的成因,捕虏晶成因说占主导地位,当然也不排除存在其他成因的可能性。近年来,前人对山东和辽宁瓦房店金刚石(1~6.5mm)的核部和边部进行了显微红外光谱分析,结果显示,金刚石的结晶时间可达600Ma,说明大颗粒金刚石是在距地表150km以上的深度、经历漫长的结晶过程形成的^[17-19]。通过金刚石和母岩(金伯利岩和钾镁煌斑岩)年龄对比发现,金刚石年龄大于或远大于其母岩年龄,只有少数金刚石与母岩年龄相近^[17-19],说明金刚石早在上地幔已形成,之后被金伯利岩浆搬运至地壳上部直至地表,为地幔捕虏晶成因说提供了直接证据。

研究区微粒金刚石呈黄绿色,大小0.22mm,为立方体与八面体聚型,透明,金刚光泽,矿物表面未见熔蚀现象,激光拉曼分析结果显示出原生金刚石的特征峰位(1332 cm^{-1}),与安徽栏杆的微粒金刚石相似^①。其外形特征可能与本身形成的深度较浅且未有足够的生长时间有关,显示出金刚石生长初期的特点^①,呈现立方体与八面体聚型,而非山东和辽宁出现的八面体金刚石。从新生代徐州地区的构造环境看,此时徐

州地区岩石圈厚度较薄、岩浆活动较频繁、大地热流值较高^[12],且距今时间很短,明显不利于金刚石的形成。其金刚石特征可能反映了金刚石在生长过程中受岩浆活动的影响,导致压力、温度条件受到扰动,金刚石生长缓慢,至新生代发生了一定规模的基性岩浆活动,恰好经过了“边缘状态的金刚石窗口”,从而将微粒金刚石携带至地表^①。因此,研究区金刚石只能来自捕获的幔源包体,其所含金刚石的贫富直接决定于岩体捕获幔源包体的能力和幔源包体的含矿性。

新生代至今,中国东部大陆经历了古近纪的伸展期和新近纪以来的挤压期,2期玄武岩浆活动在地球化学特征等方面存在一定的差异^[12]。研究区橄榄玄武玢岩总体呈弱碱性,是来自富集地幔部分熔融的产物,富集不相容元素和LREE,且岩体中的幔源包体较少,整体表现为古近纪伸展期玄武岩浆的

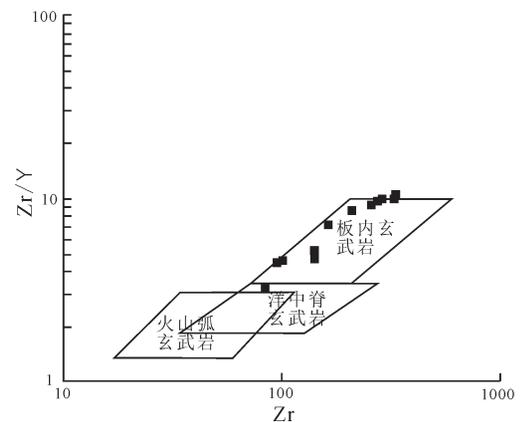


图9 橄榄玄武玢岩Zr-Zr/Y判别图解(底图据参考文献[8])

Fig. 9 Zr-Zr/Y diagram of olivine basaltic porphyrite

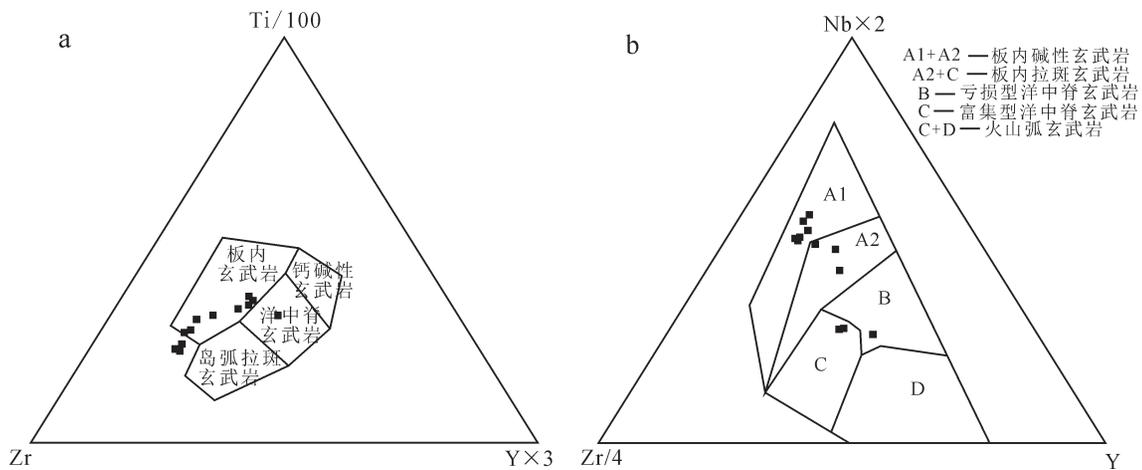


图 10 橄榄玄武玢岩 Ti/100-Zr-Yx3(a)和 Zr/4-Nbx2-Y(b)判别图解(底图据参考文献[8])

Fig. 10 Ti/100-Zr-Yx3(a) and Zr/4-Nbx2-Y(b) diagrams of olivine basaltic porphyrite

特征,而不同于新近纪玄武岩浆的整体呈强碱性、形成于亏损地幔部分熔融、强烈富集 LREE 和不相容元素且出现大量幔源包体的特点,反映了该期橄榄玄武玢岩来源深度较浅,不利于幔源包体的携带。野外调查也发现,研究区橄榄玄武玢岩虽也含有深源包体,但含量较少。因此笔者认为,研究区橄榄玄武玢岩不具备携带大量深源包体的条件,其金刚石含矿性较差,难以形成原生金刚石矿床。

对于研究区微粒金刚石成因、年代和金刚石母岩特征、含矿性等还有很多亟待研究和解决的问题,后续将继续完善,以期为本区寻找金刚石原生矿提供方向,甚至为金刚石找矿理论的发展起到重要的补充作用。

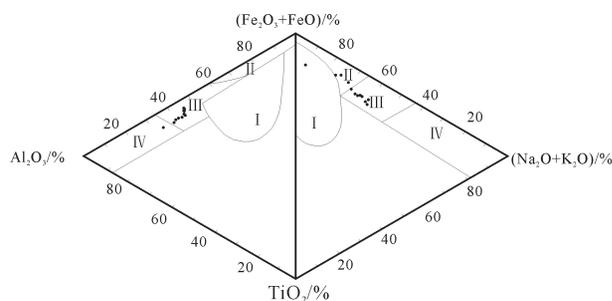


图 11 橄榄玄武玢岩(Fe₂O₃+FeO)-Al₂O₃-TiO₂-(Na₂O+K₂O)图解(底图据参考文献[7])

Fig. 11 (Fe₂O₃+FeO)-Al₂O₃-TiO₂-(Na₂O+K₂O) diagram of olivine basaltic porphyrite

I—金伯利岩区; II—超基性岩区; III—基性岩区;
IV—酸性岩和碱性岩区

6 结 论

(1)研究区橄榄玄武玢岩总体属碱性玄武岩,主量和微量元素特征均显示其为演化程度较高的岩浆结晶分异作用的产物。具有轻稀土元素稍富集、轻重稀土元素分馏程度略高的特征, Eu 与 Sr 均表现为一致的正异常,表明其在岩浆结晶过程中存在一定程度的斜长石堆晶作用。

(2)研究区橄榄玄武玢岩中大离子亲石元素(LILE) Rb、Ba、Sr 相对富集,高场强元素(HFSE) Nb、La、Nd 略富集, Ce、P、Th、U、Zr 元素亏损。微量元素判别图解显示,研究区橄榄玄武玢岩形成于大陆板内环境,是在板内拉张构造背景下由石榴子石相的富集地幔经较低程度的部分熔融形成的,在上升过程中遭受了微弱的地壳混染。

(3)研究区微粒金刚石与安徽栏杆金刚石相似,显示出金刚石生长初期的特点,应为幔源捕获成因。与金伯利岩相比,研究区橄榄玄武玢岩在地球化学特征方面存在明显差异,结合其形成时的构造背景,整体表现为古近纪伸展期玄武岩浆的特征,不具备携带大量深源包体的条件,难以形成原生金刚石矿床。

致谢:野外调查、采样工作由项目组人员完成,样品测试由河北省区域地质调查研究所实验室完成,成文过程中得到江苏省地质矿产局第五地质大队严锦文教授级高工的指导和帮助,江苏省地质矿产局第五地质大队施建斌教授级高工对本文提出

了宝贵的修改意见,在此一并致以诚挚的谢意。

参考文献

- [1]柳永清,高林志,刘燕学,等.徐淮地区新元古代初期镁铁质岩浆事件的锆石U-Pb定年[J].科学通报,2005,50(22):2514-2521.
- [2]王清海,杨德彬,许文良.华北陆块东南缘新元古代基性岩浆活动:徐淮地区辉绿岩床群岩石地球化学、年代学和Hf同位素证据[J].中国科学:地球科学,41(6):796-815.
- [3]贺世杰.徐州地区晚元古代辉绿岩墙岩石成因的初步研究[D].中国科学院广州地球化学研究所硕士学位论文,2003.
- [4]曾罡.华北克拉通东南缘新生代碱性玄武岩的成因[D].南京大学博士学位论文,2011.
- [5]王陆超,汪吉林,李磊.徐宿地区构造特征及其演化[J].地质学刊,2011,35(3):247-250.
- [6]陈道公,彭子成.皖苏若干新生代火山岩的钾氩年龄和铅铋同位素特征[J].岩石学报,1988,(2):3-12.
- [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.
- [8]杨学明,杨晓勇,陈双喜.岩石地球化学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2000:40-153.
- [9]刘瑞.中国东部碱性基性岩与金刚石矿床成矿机制研究[J].长春工程学院学报(自然科学版),2003,4(4):1-4.
- [10]廖宝丽.贵州二叠纪碱性玄武岩的岩石学和地球化学研究[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2013.
- [11]周家云,郑荣才,朱志敏,等.四川会理拉拉铜矿辉长岩群地球化学与Sm-Nd同位素定年[J].矿物岩石地球化学通报,2009,28(2):111-122.
- [12]牛漫兰,朱光,宋传中,等.郟庐断裂带中南段新生代玄武岩源地幔特征及其演化[J].现代地质,2001,(4):383-390.
- [13]韩吟文,马振东,张宏飞,等.地球化学[M].北京:地质出版社,2003:186-283.
- [14]赵振华.微量地球化学原理[M].北京:科学出版社,2016:368-370.
- [15]Weaver B L. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 104(2): 381-397.
- [16]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,1999,4(4):28-36.
- [17]尹作为,路凤香,陈美华,等.山东蒙阴金刚石的形成时代及地质环境[J].地学前缘,2005,(4):614-621.
- [18]杨志军,彭明生,谢先德,等.金刚石的微区显微红外光谱分析及其意义[J].岩矿测试,2002,(3):161-165.
- [19]杨志军,梁榕,曾祥清,等.山东蒙阴金刚石多晶的显微红外光谱研究及其成因意义[J].光谱学与光谱分析,2012,32(6):1512-1518.
- ①蔡逸涛,杨献忠,张洁,等.安徽栏杆金刚石成矿规律与苏皖地区金刚石找矿靶区优选成果报告.中国地质调查局南京地质调查中心.2015.