

doi: 10.12029/gc20180210

蔡逸涛, 张洁, 董钟斗, 曹正琦, 肖书阅, 李帅, 李成凯, 陈乐柱, 范飞鹏. 2018. 皖北栏杆地区新元古代岩浆活动: 含金刚石母岩 U-Pb 年代学及地球化学制约[J]. 中国地质, 45(2): 351-366.

Cai Yitao, Zhang Jie, Dong Zhongdou, Cao Zhengqi, Xiao Shuyue, Li Shuai, Li Chenkai, Chen Lezhu, Fan Feipeng. 2018. Neoproterozoic basic magmatism in the north of Anhui Province: Evidence from whole-rock geochemistry and U-Pb geochronology of Diabase in Langan area[J]. Geology in China, 45(2):351-366 (in Chinese with English abstract).

皖北栏杆地区新元古代岩浆活动: 含金刚石母岩 U-Pb 年代学及地球化学制约

蔡逸涛^{1,2} 张洁^{1,3} 董钟斗⁴ 曹正琦³ 肖书阅⁵ 李帅⁵ 李成凯⁶ 陈乐柱¹ 范飞鹏¹

(1. 南京地质调查中心, 江苏南京 210016; 2. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210093; 3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北武汉 430074; 4. 安徽省地勘局第二水文地质工程勘察院, 安徽芜湖 241000; 5. 湖南省地质矿产勘查开发局四一三队, 湖南常德 415000;

6. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 中国东部皖北地区分布着大量镁铁质岩, 岩石类型为辉绿岩、辉绿辉长岩、辉绿玢岩等。本文对皖北栏杆地区侵位于元古宙地层中的辉绿岩进行系统的 U-Pb 年代学、岩石地球化学研究。结果显示, 该区绝大多数辉绿岩的侵位结晶年龄为 870~890 Ma, 形成于新元古代早期。辉绿岩化学成分以高 SiO₂、CaO 和 (K₂O < Na₂O) 为特征, 属于板内碱性玄武岩系列岩石。总体上略富集轻稀土元素(LREE)、富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Ba、La, 略亏损高场强元素(HFSE)Th、Nb、Ta、Zr、Hf 等, 相对富集 Cr 和 Ni。本次研究暗示皖北栏杆地区存在新元古代早期的构造-岩浆活动事件, 并为金刚石带出地表创造了条件。结合新元古代全球 Rodinia 超大陆裂解事件及其岩浆活动与地幔柱的密切关系, 皖北地区新元古代辉绿岩墙群应该是一次地幔柱作用在华北陆块边缘的记录。

关键词: 金刚石; U-Pb; 年代学; 岩石地球化学; 皖北栏杆

中图分类号: P597.3; P595; P588.12⁴ 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)02-0351-17

Neoproterozoic basic magmatism in the north of Anhui Province: Evidence from whole-rock geochemistry and U-Pb geochronology of Diabase in Langan area

CAI Yitao^{1,2}, ZHANG Jie^{1,3}, DONG Zhongdou⁴, CAO Zhengqi³, XIAO Shuyue⁵, LI Shuai⁵,
LI Chenkai⁶, CHEN Lezhu¹, FAN Feipeng¹

(1. The Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 4. The Second Institute of Hydrology and

收稿日期: 2016-07-30; 改回日期: 2017-03-23

基金项目: 国家青年科学基金项目(41402075)和中国地质调查局地调项目(12120114054301)联合资助。

作者简介: 蔡逸涛, 男, 1982 年生, 博士, 助理研究员, 从事金刚石矿产地质调查及研究; E-mail: ivan821129@163.com。

通讯作者: 张洁, 女, 1980 年生, 博士, 高级工程师, 从事金刚石矿产及遥感地质学研究; E-mail: 3976618@qq.com。

Engineering Geological Prospecting of Anhui Geological Prospecting Bureau, Wuhu 241000, Anhui, China; 5. Team 413 of Geology & Mineral Resources Development Bureau, Changde 415000, Hunan, China; 6. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The mafic rock is exposed in North Anhui province of the East China. It consists of diabase, gabbro–diabase and diabase–porphyrite. This paper presents a synthetic U–Pb isotopic study of zircons and a whole–rock geochemical study on diabase that were emplaced into the Proterozoic formations in the Langan area of the North Anhui province. The SHRIMP U–Pb zircon dating results indicate that the diabase were emplaced at ca.870–890 Ma. Geochemically, the diabase swarms are characterized by enriched in SiO₂, CaO and (K₂O<Na₂O). It is therefore deduced that the diabases might belong to intraplate tholeiite occurring within the North China Plate. There are also show relative enrichment in LREE and LILE(Rb, Ba and La), a comparative enrichment in Cr and Ni, but a slight depletion in HFSE(Th, Nb, Ta, Zr and Hf). They are plotted in the within–plate tholeiite series on the tectonic discrimination diagrams. Taken together, these geochemical and isotopic data suggest that the primary magmas to form the diabase dykes in the Langan area could have been derived from a transitional mantle in the Mesoproterozoic, and were most probably emplaced under a continental margin extensional setting at ca.870–890 Ma. The results of this study demonstrate that the Neoproterozoic magmatism occurred at the Langan area of the North Anhui province, and created conditions for diamond mineralization. Taken along with the Neoproterozoic breakup of the Rodinia Supercontinent and the close relationship between the coeval magmatism and the hypothesis of a superplume, it is reasonable to contribute the emplacement of the Neoproterozoic diabases in the Langan area to the geochemical fingerprints the contemporaneous mantle plume activity preserved in the continental margin of the North China Block.

Key words: diamond mineralization; U–Pb zircon dating; geochemistry; Langan

About the first author: CAI Yitao, born in 1982, male, doctor, research assistant, mainly engages in the study of diamond deposits; E–mail: ivan821129@163.com.

About the corresponding author: ZHANG Jie, born in 1980, female, doctor, senior engineer, mainly engages in the study of diamond deposits and remote sensing geology; E–mail: 3976618@qq.com.

Fund support: Supported by the Natural Science Foundation of China (No. 41402075) and China Geological Survey Program (No. 12120114054301).

1 引 言

国内外专家学者(张培元, 1998 a; 张培元, 1998b; Fedortchouk et al., 2013; Kogarko et al., 2013)认为目前含金刚石的寄主岩石, 可以包括金伯利岩、钾镁煌斑岩、榴辉岩(蛇绿岩杂岩中的榴辉岩和片麻岩、结晶片岩中的榴辉岩)、蛇绿岩套、碱性超基性(火山)杂岩、碱性超基性煌斑岩和橄榄岩类(蛇绿岩杂岩中的方辉橄榄岩、片麻岩中的石榴石橄榄岩、纯橄榄岩等)等多种偏碱性超镁铁质岩石。国内也相继在金伯利岩和钾镁煌斑岩外的基性–超基性岩中发现金刚石。杨经绥等(2007, 2012, 2014)、徐向珍等(2015)和黄竺等(2015)报道在雅鲁藏布江缝合带的6个蛇绿岩型地幔橄榄岩体、缅甸密支那的蛇绿岩和内蒙古蛇绿岩中均发现了金刚石等超高压矿物, 并提出了蛇绿岩型金刚石。戎

合等(2013)则报道了在西藏罗布莎橄榄岩和中国大陆科学主钻(CCS–MH)的榴辉岩中也发现了金刚石。

2011–2012年, 安徽省地勘局第二水文工程地质勘查院及南京地质调查中心先后在栏杆地区的辉绿岩、橄榄玄武岩等不同基性岩中分别选出金刚石。随后开展了一系列工作, 截止目前累计选出金刚石数量已过千粒, 这是中国首次在辉绿岩中发现金刚石。本文试从栏杆地区的含金金刚石母岩——辉绿岩的地球化学、年代学特征等方面来提供新元古代基性岩浆活动的证据, 从而为该区金刚石成矿条件寻找理论基础。

2 区域地质背景

皖北栏杆地区位于安徽宿州市埇桥区(庄继翔, 2013), 区域上位于华北克拉通的东南缘, 郯庐断裂

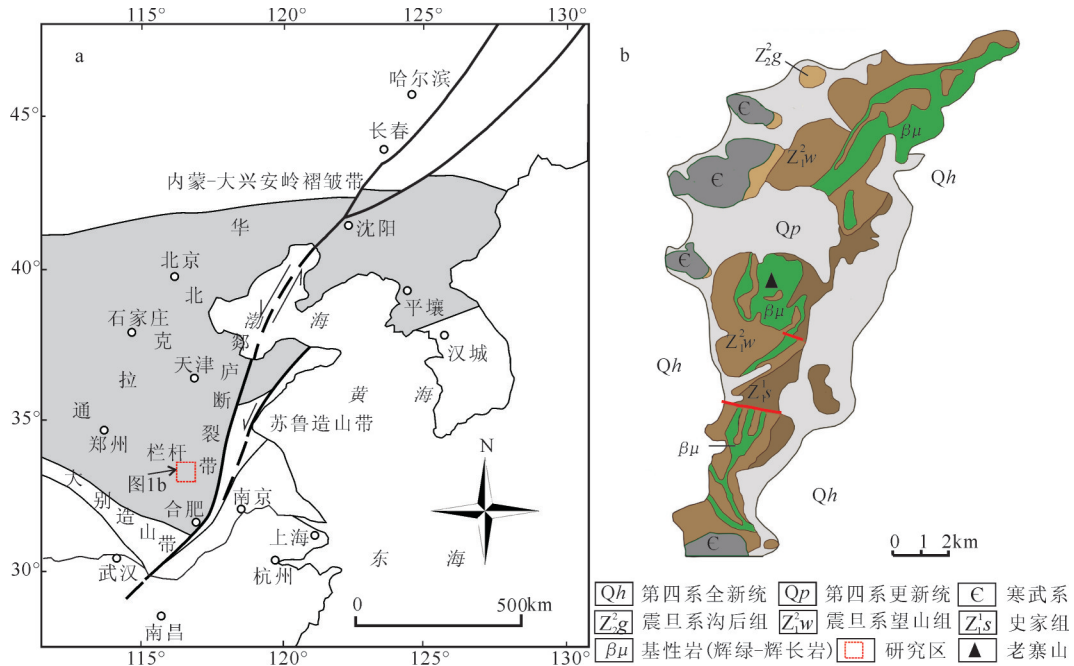


图1 郯庐断裂带构造简图(a)及栏杆地区地质简图(b) (蔡逸涛等, 2014; 张洁等, 2015)
Fig.1 Structure map of Tanlu fault belt(a) and geological sketch map of Langan area(b)

(after Cai Yitao et al., 2014; Zhang Jie et al., 2015)

带(黄先觉, 2012)的东侧(图 1a)。众所周知, 郯庐断裂带是中国东部一条著名的深大断裂带, 与金刚石成矿关系十分密切, 辽宁、山东金刚石成矿区就位于郯庐断裂两侧(朱连兴, 1992; 付长江, 1993; 齐玉兴等, 1998; 尹作为等, 2005; 殷莉等, 2008; 李月新, 2010; 赵建军等, 2011; 陈华等, 2013; 庄继翔, 2013)。栏杆地区内次级断裂带主要由 3 条断裂组成(嘉庐深断裂、石门山断裂、五河—合肥深断裂), 呈北北东走向, 断层面一般倾向东, 局部倾向西, 倾角 60~80°。其他断裂构造以 EW 向为主, 如金山寨断层、小望疃断层等(姚仲伯, 1986)。从大地构造背景来看栏杆地区则属于华北地块的灵璧台穹 IV 级构造单元, 位于 NNE 向时窑背斜的西翼, 在其南部解集一带存在黑峰岭推覆构造(向斜)。

栏杆地区主要出露元古界和下古生界, 岩性多为白云岩、灰岩、页岩、砂岩和燧石砾岩等(姚仲伯, 1986)。研究区基底为新太古界五河群和古元古界凤阳群, Sr-Nd 同位素年龄为 1.8~2.9 Ga, 总厚度大于 6000 m。根据区域航磁资料推测, 宿州以北地区可能是泰山群的发育地区, 但该区未见其露头; 五河群主要为一套低角闪岩相的变质岩, 原岩为次深海—浅海槽盆相的火山沉积岩系, 具有绿岩带特

征, 包括黑云(斜长)角闪片麻岩夹浅粒岩, 绢云石英片岩、绿泥石片岩及蛇纹石化大理岩, 斜长角闪岩、石英岩、角闪钾长片麻岩等。盖层只发育新元古界青白口系、南华系、震旦系(史家组、望山组、沟后组)及古生界寒武系(猴家山组、馒头组、毛庄组、徐庄组、张夏组), 下奥陶统的石英岩、灰岩、页岩等, 总厚度达 7000 m。在中奥陶世至早石炭世, 克拉通处于隆起剥蚀状态, 沉积间断造成上奥陶统、志留系、泥盆系、下石炭统缺失。侏罗纪以来形成陆相沉积, 包括河湖相及中性火山岩复陆屑建造组合。该区基底构造格局是从两个古陆核(碭山和隐贤集)形成开始, 经历了多个构造旋回阶段, 凤阳运动以后陆壳基本固结, 进入克拉通发展阶段(黄先觉, 2012; 庄继翔, 2013)。

栏杆地区岩浆岩较为发育, 主要有辉绿岩和石英正长斑岩、斜闪煌斑岩等。其中辉绿岩主要出露于宝光寺、猫头山至老寨山、大堂山一带, 侵入震旦系望山组、史家组地层中(图 1b), 呈 NNE 向条带状弧形展布于研究区中部, 长度大于 19 km(向北延入江苏境内), 最宽 1.6 km(猫头山—老寨山一带)。辉绿岩岩体两侧有脉状体平行分布, 受横断层破坏岩体分支较多。岩体剥蚀深度较浅, 保留了较多捕虏

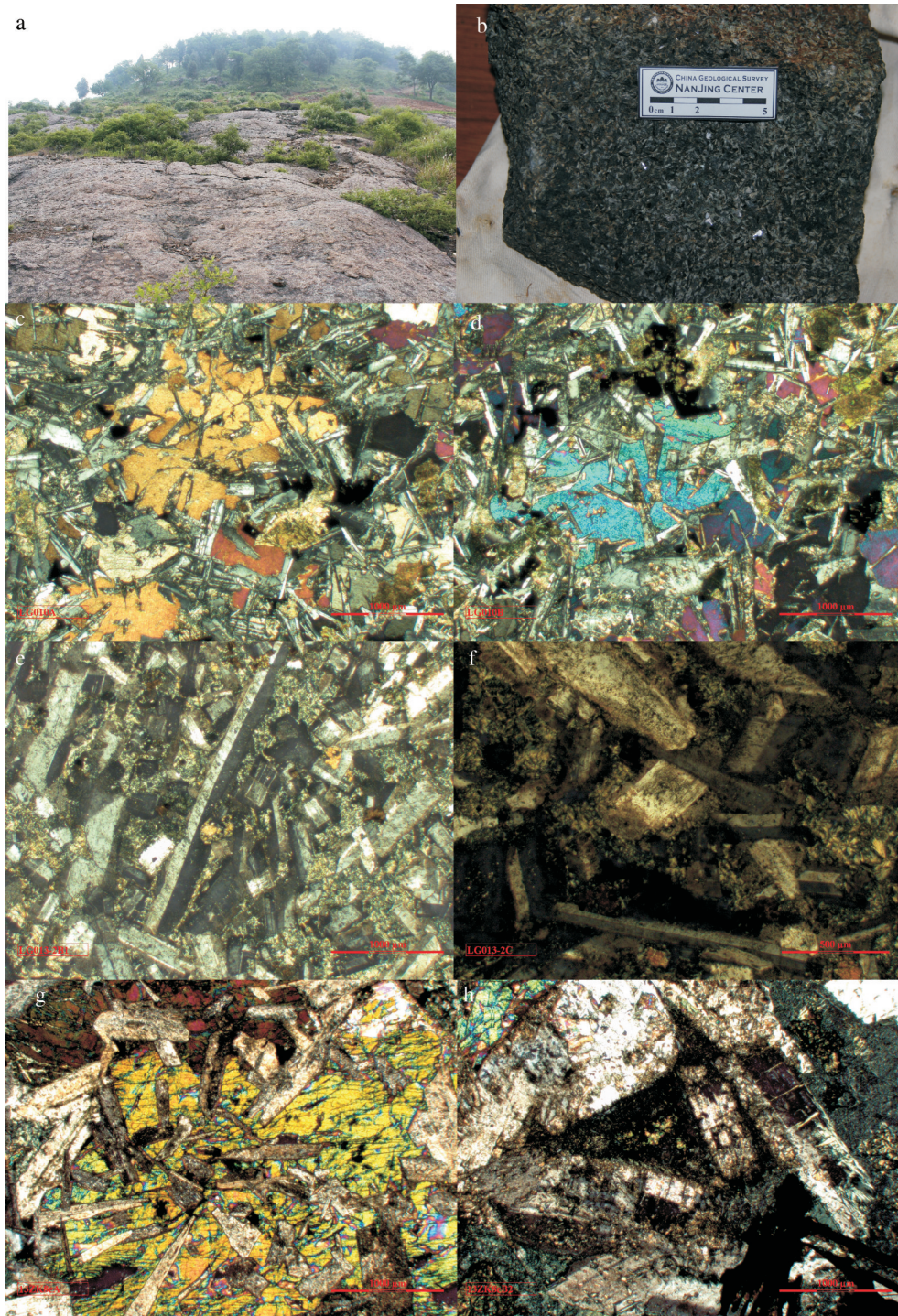


图2 栏杆地区辉绿岩显微照片

a—老寨山辉长辉绿岩照片;b—中粗粒辉长辉绿岩;c—细粒辉绿岩含长、次含长结构;d—细粒辉绿岩中次含长结构;e—钾化细粒辉绿岩中后成变晶作用;f—钾化细粒辉绿岩中斜长石被钾化;g—中粗粒辉绿岩中含长结构;h—斜长石构成三角格架

Fig.2 Photomicrograph of diabase in Langan area

a—the gabbro-diabase of Laozhangshan;b—medium-coarse grained gabbro-diabase;c—ophitic texture and subophitic texture of fine-grained diabase;d—subophitic texture of fine-grained diabase;e—tecolblastesis in the Potsash feldspathization fine-grained diabase; f—plagioclase with potassic alteration in the Potsash feldspathization fine-grained diabase;g—ophitic texture of medium-coarse diabase;h—Plagioclase constitute a triangular lattice in the diabase

体及顶盖(姚仲伯, 1986)。

3 样品及分析方法

3.1 样品描述

栏杆地区辉绿岩样品主要来自老海寺林场的钻孔13zk10、老寨山岩体(图2a、图2b)以及吴庄浅井和吴庄东南的闵磊采石场。辉绿岩是该区最主要的含金刚石母岩,其中已选出金刚石上千颗。

野外观察辉绿岩略有细粒—中粗粒结构上的相变。辉绿岩一般呈灰绿色、灰黑色、墨绿色,风化后多呈深棕色、褐棕色、黄褐色,辉绿结构,局部见辉长结构,块状构造、局部雪花状构造(主要为长石、黑云母及辉石晶体呈团簇状分布,黑云母呈中—弱蚀变),主要矿物成分为:斜长石约60%,辉石30%~40%,其他矿物有云母、磁铁矿、黄铁矿、少量橄榄石等矿物,总量小于10%。岩石较均匀绿帘石化,局部绿泥石化、钾长石化发育,少量碳酸盐化(图2e、图2f)。部分中粗粒辉绿岩中可见钛铁矿骸晶。

老海寺林场位于老寨山岩体东部,辉绿岩体主要位于史家组之下。颗粒较粗,斜长石较多。以次含长结构为主,局部显示辉绿结构的特征。单斜辉石,无色,可见某些切片方向具有比解理更加细小密集的裂缝,可能是{100}裂理,属异剥辉石。蚀变矿物多为绿泥石、纤闪石等。基性斜长石柱状、长柱状,表面褐灰色,高倍镜下观察,表面除黏土质外,尚可见纤维状集合体和一些绢云母。副矿物多为钛铁矿,往往可见骸晶。

闵磊采石场内基性岩体在史家组下,中—粗粒辉绿岩,具有嵌晶含长—次含长结构(图2c、图2d),粗大的等轴状单斜辉石内含有斜长石自形条柱状晶体,由于斜长石很多,大的辉石晶体常被分割成很多小块,光性方位仍然一致,其他特征与老寨山辉绿岩一致。

3.2 分析方法

对采取的样品(20 kg)经人工破碎后,按常规的重力和磁选方法分选出锆石,最后在双目显微镜下挑选(廊坊诚信地质服务公司)。将待测样品锆石颗粒置于环氧树脂中制靶,然后磨至一半,用于反射光和SHRIMP U-Pb同位素分析。其中反射光照片在南京地质调查中心基础地质室拍摄,CL阴极发光照片在北京锆年领航公司实验室的扫描电镜分

室拍摄。在显微镜观察的基础上,选择合适的样品进行反射光和阴极发光研究,特别避开锆石包裹体以及锆石内部裂隙,以进行下一步的SHRIMP测试。

锆石的U、Th和Pb同位素测试在北京离子探针中心SHRIMP II仪器上完成。应用标准锆石TEMORA(417 Ma)对 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值进行校正,SL13(U含量为 238×10^{-6} ,平均Th/U=0.09)用于标定样品的U、Th含量(Black et al., 1978),数据处理采用Ludwig SQUID 1.0和Isoplot程序完成,详细的实验原理和分析、数据处理流程参见宋彪等(2015)。应用实测 ^{204}Pb 对锆石进行普通铅校正,分析误差为 2σ ,置信度为95%。

主量元素和微量元素分析在南京地质调查中心实验室完成。主量元素采用玻璃熔片大型X射线荧光光谱法(XRF)分析;微量元素采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行分析。

4 分析结果

4.1 SHRIMP 锆石定年

本次年龄测试样品主要是从吴庄闵磊采石场(LG008)、老海寺辉绿岩(LG020、LG017)中分离出的锆石和斜锆石样品。从CL图像可以看出,锆石晶形大多不完整,半透明或者不透明,板状。无明显或弱的岩浆振荡环带或内部构造,为典型的基性岩锆石。其中部分锆石颜色较深,这可能与U和Th的含量较高有关。表1中可见锆石的Th/U比值均大于1,表明所用的锆石均为岩浆成因。为获取锆石的年龄,对其中3个样品挑选出来的锆石(LG020为斜锆石)进行了SHRIMP分析。

锆石SHRIMP U-Pb定年结果列于表1,部分结果显示于图3。测年结果显示,研究区辉绿岩中锆石SHRIMP U-Pb年龄谱系相对较复杂。辉绿岩(LG008)中锆石年龄比较分散,其中21个分析点中有11个点比较集中在谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为856~901 Ma,其年龄加权平均值分为两组,分别为(876.4±4.9) Ma和(892.8±7.5) Ma。其他分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄明显偏小,显示研究区可能经历了中生代时期构造热事件的影响,而这些分析点不同程度偏离谐和线,可以解释为放射性成因铅丢失。其中 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄最小值为259.5 Ma,可以认为是后期

表1 辉绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年数据
Fig.1 SHRIMP zircon U-Pb analytical results for the diabase in Langan area

样品点	U/10 ⁶	Th/10 ⁶	Th/U	同位素比值				表面年龄/Ma					
				²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	
					2σ		2σ		2σ		2σ		2σ
LG008-1	430	677	1.58	0.15050	0.51371	0.07159	0.84733	902.0	4.4	902.5	6.3	926	24
LG008-2	638	3090	4.84	0.13484	0.44484	0.07008	0.79561	813.6	3.4	916.5	36.6	873	25
LG008-3	179	620	3.46	0.14493	0.77570	0.06963	1.45936	872.0	6.3	867.8	15.8	902	32
LG008-4	513	1025	2.00	0.14528	0.47912	0.06911	0.86398	874.0	3.9	881.8	6.5	889	19
LG008-5	535	1218	2.28	0.14882	0.53987	0.06985	0.85169	894.1	4.5	912.8	7.8	919	18
LG008-6	227	418	1.84	0.14640	0.69806	0.07069	1.29522	880.1	5.7	882.7	8.5	931	28
LG008-7	966	2152	2.23	0.13338	0.41489	0.06835	0.67051	806.0	3.2	823.4	5.9	844	18
LG008-8	786	4349	5.54	0.10814	0.42518	0.06778	0.81122	659.3	2.7	804.5	69.8	755	29
LG008-9	765	1534	2.00	0.14881	0.41141	0.06966	0.70956	893.7	3.4	904.8	8.7	901	17
LG008-10	656	1580	2.41	0.14687	0.43104	0.06917	0.76522	882.8	3.6	896.5	6.4	888	18
LG008-11	1320	2466	1.87	0.10699	0.33761	0.06644	0.64471	654.1	2.1	665.3	3.5	773	19
LG008-12	627	2288	3.65	0.14489	0.44576	0.06893	0.78658	871.6	3.6	915.9	12.7	877	17
LG008-13	1658	4827	2.91	0.06053	1.13172	0.06562	0.77195	375.7	4.2	395.4	11.0	555	43
LG008-14	784	2458	3.13	0.14365	0.40430	0.06970	0.69602	864.6	3.3	901.8	9.4	902	17
LG008-15	688	1993	2.90	0.12250	0.48761	0.06811	0.80921	744.3	3.5	782.7	10.2	848	22
LG008-16	808	3645	4.51	0.11628	0.41760	0.06815	0.77398	706.7	2.8	806.2	28.6	785	26
LG008-17	710	988	1.39	0.14250	0.42737	0.06985	0.75830	858.5	3.4	866.3	4.6	916	16
LG008-18	335	413	1.23	0.14774	0.60220	0.06972	1.21240	887.9	5.0	894.7	6.4	909	25
LG008-19	688	1045	1.52	0.14577	0.46842	0.06934	0.73040	876.5	3.8	887.2	5.3	888	17
LG008-20	546	1423	2.60	0.14747	0.47384	0.07003	0.83349	886.3	3.9	902.5	7.5	915	18
LG008-21	3577	11252	3.15	0.04186	0.30198	0.06992	0.66378	259.5	0.9	279.6	3.4	401	60
LG017-1	808	1803	2.23	0.12432	0.44781	0.17275	3.69497	657.1	6.9	680.7	13.2	714	373
LG017-2	1235	2140	1.73	0.10688	0.38212	0.07675	0.66081	646.4	2.5	664.5	4.2	813	37
LG017-3	536	662	1.24	0.14575	0.47397	0.07060	0.83984	877.0	3.9	881.4	5.0	945	18
LG017-4	929	2165	2.33	0.13512	0.55994	0.08181	1.03466	804.1	4.4	822.2	7.8	881	47
LG017-5	510	696	1.36	0.15003	0.48506	0.07716	0.82640	891.7	4.3	896.9	5.4	876	51
LG017-6	1564	3076	1.97	0.08937	0.33543	0.08722	2.08355	534.5	2.4	549.9	7.5	642	114
LG017-7	841	1964	2.33	0.13706	0.39594	0.15362	2.62950	738.6	7.2	769.1	11.4	672	312
LG017-8	334	534	1.60	0.14552	0.61019	0.14391	8.14695	791.6	13.7	804.0	19.1	674	659
LG017-9	609	1153	1.89	0.14749	0.43321	0.11059	1.07129	843.1	4.5	867.6	6.0	890	99
LG017-10	603	1101	1.82	0.14290	0.43523	0.10844	2.15901	820.0	5.1	827.9	7.4	870	142
LG017-11	1360	3044	2.24	0.09568	0.34800	0.08224	0.60685	575.6	2.3	602.4	3.9	713	63
LG020XIE-2	87	2	0.03	0.14264	0.94694	0.07556	2.04852	854.4	8.2	853.7	7.7	943	99
LG020XIE-4	94	5	0.06	0.14012	0.93812	0.07313	1.99631	840.3	7.9	840.5	7.6	870	95

构造热事件的改造年龄。因此 876 Ma 和 892 Ma 两组年龄可以代表该区辉绿岩的结晶年龄。

LG017 号锆石样品和 LG020 号斜锆石样品测定点数较少并且比较分散。但是将 3 个样品所有分析点置于频度图上可见 850~900 Ma 是最主要的峰值年龄,并且斜锆石(LG020)的 2 个分析点年龄分别为 854.4 Ma 和 840.4 Ma。因此,可以判断栏杆地区辉绿岩的结晶年龄应该在 870~900 Ma 的范围内。

4.2 主微量元素特征

该区辉绿岩的主微量及稀土元素含量见表 2 和表 3。以主量元素做 TAS 图解可以看出本区辉绿岩

的投影点都落于辉长岩范围。但考虑到热液蚀变中 K、Na 等元素比较活泼,因此,利用 TAS 图解判别岩石类型可能会产生误差。笔者利用 Ti、Zr、Y 和 Nb 等元素在蚀变过程中不活泼的性质来做进一步的判别,发现在 Nb/Y-Zr/TiO₂ 判别图中(图 6),所有样品都落入亚碱性玄武岩范围内,与 TAS 图结果基本一致。

全岩主量元素分析结果表明,辉绿岩中 SiO₂ 含量为 45.12%~50.09%, K₂O+Na₂O 为 3.46%~5.78%, Na₂O>K₂O, Al₂O₃ 为 10.98%~14.64%, CaO 为 4.63%~13.92%, Fe₂O₃^T 为 11.24%~19.13%, MgO 为 4.34%~

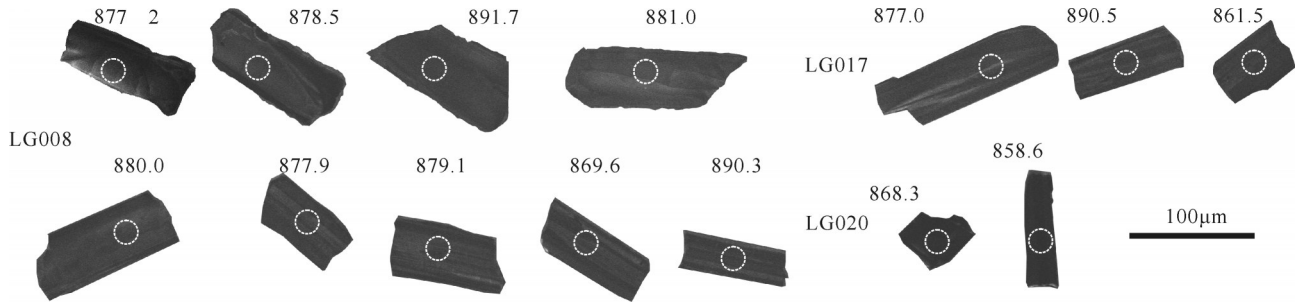


图3 辉绿岩锆石(斜锆石)CL照片(LG008/LG017/LG020)

Fig.3 CL images of zircon (baddeleyite) for the diabase in Langan area (LG008/LG017/LG020)

8.32%, $Mg^{\#}$ 在 33.6~59.4, 绝大多数在 50.4~59.4。与中国东部中元古代基性岩墙群相比, 明显显示出较高的 SiO_2 和 CaO 含量, 钾、钠含量多数偏低, 铝的含量偏低, 镁、铁含量相近。

主量元素 Haker 图解如图 7 所示, 主量元素的含量与 MgO 的变化并不十分明显, 随着 MgO 的含量升高, SiO_2 降低, Al_2O_3 含量变化却不大, 反映出岩浆在上升侵位过程中的分离结晶作用并不强。 K_2O+Na_2O 与 MgO 相关性也不明显, CaO 随 MgO 的增加而呈负相关性, 显示了辉绿岩早期结晶相可能为辉石、斜长石和少量橄榄石。

TiO_2 含量范围分别为 1.55%~4.1%, 高的 TiO_2 含量可能暗示源自软流圈流体参与了岩浆的活动。地壳中 K 含量较地幔中要高出数十倍甚至上百倍, 而 P 、 Ti 则在地壳和地幔中含量相近, 因此通过 K_2O/TiO_2 、 K_2O/P_2O_5 比值可以用来判断岩浆在上升过程中是否受地壳物质混染或岩浆熔融源区是否有大陆地壳物质加入。该区辉绿岩 K_2O/TiO_2 、 K_2O/P_2O_5 比值与 MgO 呈负相关(图 7), 这表明辉绿岩岩浆的演化伴随了地壳物质的加入。随着 MgO 增加, 全铁和 P_2O_5 的含量与 MgO 呈较弱的负相关。

本区辉绿岩的微量元素丰度如表 3。曲线呈右倾, 强不相容元素 Rb 、 K 最为富集。在中等不相容元素中, 以 La 的富集和 Nb 、 Sr 的亏损为特征。但是吴庄浅井中辉绿岩的 Sr 却显示为正异常, 说明受地壳的混染程度不同。岩石的大离子亲石元素 K 、 Rb 、 Sr 、 Ba 和高场强元素 Nb 、 Zr 、 Th 等含量及比值均大于幔源岩浆的相应比值(Jagoutz et al., 1979), 反映岩石为原始岩浆经过了分异作用的产物。

辉绿岩的稀土元素丰度见表 3, 本区辉绿岩 $\sum REE$ 在 $(57\sim 197)\times 10^{-6}$, $\sum LREE$ 范围为 $(42\sim 159)\times 10^{-6}$, $\sum HREE$ 范围为 $(15\sim 37)\times 10^{-6}$ 。 $LREE/HREE$

为 2.72~4.58, La_N/Yb_N 为 2.07~4.10, $\delta Eu=0.95\sim 1.24$, 表明稀土元素分馏程度不高。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线具有右倾特征(图 8), 总体呈现出稀土总量较高、轻稀土富集和重稀土亏损; Eu 的正异常较明显, 可能与斜长石斑晶含量较高有关。

前人研究过部分熔融和分离结晶作用过程中 REE 的地球化学行为, 根据部分熔融和分离结晶 REE 元素定量模型的各自特点, 选择不相容元素 La (H 元素) 和中等分配系数元素 Sm (M 元素) 作 $La/Sm-La$ 图解, 并利用其判别岩浆成因、部分熔融作用以及叠加的分离结晶作用的影响(Treuil et al., 1975)。结果表明, 在一次部分熔融的过程中, La 、 Sm 比值将随着 La 的含量增加而增大, 同源岩浆分离结晶作用过程中 La 、 Sm 的比值是不随 La 的丰度增加而变化的, 它的比值保持在一个相对稳定的范围内。

本区辉绿岩稀土元素 $La-La/Sm$ 关系图(图 9) 显示出较为明显的正相关性, 说明本区的辉绿岩浆在形成过程中主要受部分熔融作用的影响。而在 $Rb/Zr-Rb/Nb$ 相关图解中, 表现为部分熔融演化的趋势(Onuma et al., 1981), 说明栏杆的辉绿岩原始岩浆经历了部分熔融。

5 讨论

5.1 成岩年代

栏杆地区含金刚石辉绿岩锆石 $U-Pb$ 年代学研究结果表明, 栏杆地区碱性基性岩的锆石 $U-Pb$ 年龄非常分散, 主要有 200~300 Ma, 400~500 Ma, 876 Ma、892 Ma, 800~900 Ma 等年龄(图 4)。辉绿岩中锆石和斜锆石主要年龄分布在 876~890 Ma, 显示了其结晶年龄, 即形成于新元古代早期(图 5)。其中最年轻的年龄在 200~300 Ma, 反映了后期构造热事

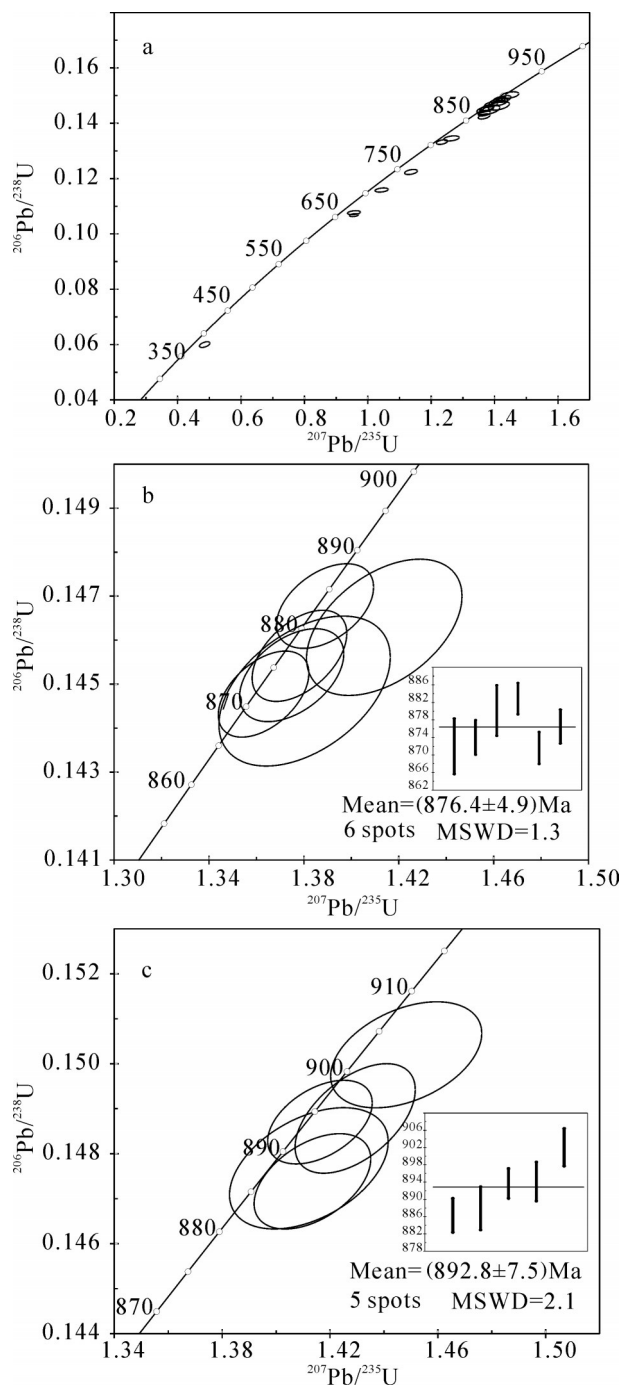


图4 辉绿岩年龄谐和图

Fig.4 SHRIMP zircon U-Pb Concordia diagrams for the diabase

件的改造年龄。而中间不同的年龄显示了其经历的不同构造热事件。

在中国南方中元古代晚期—新元古代早期 Rodinia 超大陆聚合过程与 Grenvill 造山作用有关的洋壳消减过程中,岩浆活动的时间为 880~1100 Ma,

其中有埃达克质花岗岩在 970 Ma 前后发育。而超大陆的裂解以及同时期的非造山岩浆活动则发生在 830~820 Ma 或 750 Ma。非造山岩浆作用已假设是元古宙伸展体制下超大陆裂解时形成,非造山岩浆作用是由于成熟的大陆岩石圈的再活化、相对小规模的重熔和侵位到克拉通核部的古老地壳中等原因造成。显然,大陆岩石圈的再活化和重熔为金刚石的再度形成提供了条件。本文获得的结果与王清海等(2011)的研究结果相吻合,而未获得中元古代末期的测年数据。研究区是否存在中元古代末期或新元古代初期两期岩浆活动,尚有待于进一步研究,但这些证据表明华北陆块的胶辽—徐淮地区在中元古代末期—新元古代初期发育有一定规模的基性岩浆活动。而与金刚石有关的岩浆活动也应该为新元古代早期,与 Rodinia 超大陆聚合过程中与 Grenvill 造山作用有关的洋壳消减过程相关。

Rodinia 超大陆的汇聚和裂解是中、新元古代一次重要的地球动力学事件。近年来, Rodinia 超大陆的构型和演化以及中国不同陆块在其中位置的研究,受到地学界广泛的关注。中国大陆由多陆块组成的特点决定了其形成与演化过程的复杂性。华北陆块经历 1.95 Ga 西部陆块聚合和 1.85 Ga 东、西陆块碰撞、1.78~1.45 Ga 南缘增生和 1.6~1.2 Ga 的北缘裂解,而相对缺乏新元古代构造—岩浆活动的记录,不过本区来自于上地幔的含金金刚石母岩——辉绿岩的研究有力佐证了这一地质过程。

5.2 构造背景及意义

前人认为基性岩墙是深源岩浆快速侵位到浅部构造裂隙内的岩浆活动,与围岩的交代作用相对较弱,因此地壳混染不是影响其岩石化学特征的主要机制,所以基性岩墙的地球化学特征基本反映了岩浆源区的性质,特别是受后期蚀变影响较小的高场强元素以及稀土元素等不活泼元素(王清海等, 2011)。

栏杆地区辉绿岩总体上富集大离子亲石元素(LILE) Rb、Ba、La, 略亏损高场强元素(HFSE) Th、Nb、Ta、Zr、Hf 等, 且相对富集 Cr 和 Ni, 其微量元素分配特征和稀土元素配分曲线特征反映岩浆源区相对比较深。辉绿岩中 Zr/Nb、Y/Nb 等这些元素比值或指数对应于过渡型地幔的元素指数, 暗示岩浆来源于过渡型地幔。Zr-Y、Zr-Nb 和 Th-Ta-La/Yb

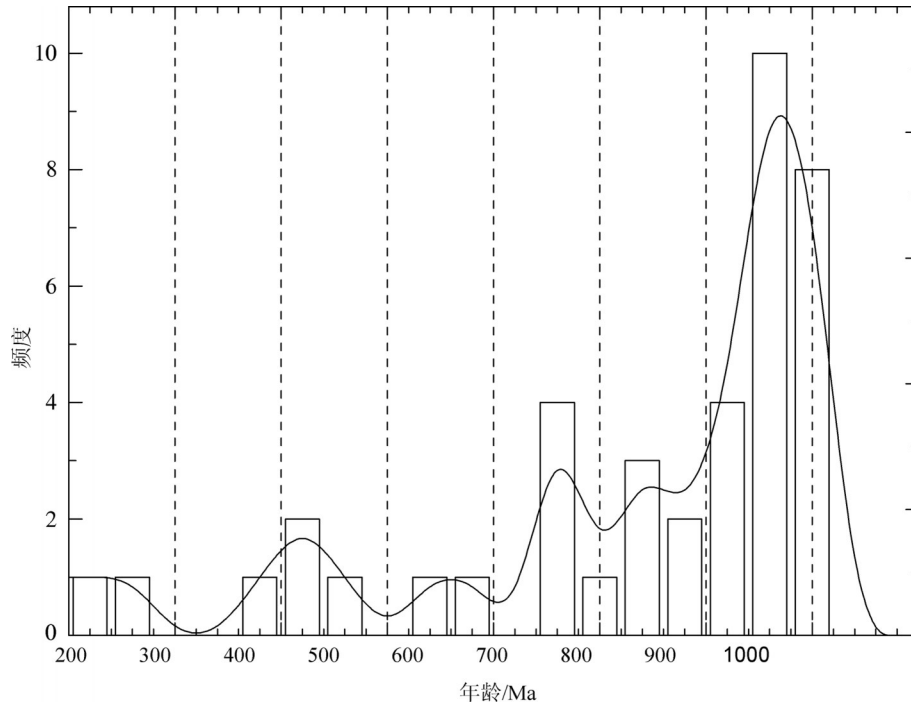


图5 辉绿岩中锆石(斜锆石)年龄频度图

Fig.5 Zircon (baddeleyite) U-Pb dating frequency diagram for the diabase

表2 栏杆辉绿岩的主量元素含量(%)

Table 2 Compositions of major elements for the diabase in Langan area(%)

送样号	室内定名	采样地点	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ⁺	FeO	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	L.O.I	Σ
LHS-10-10	中粒辉绿岩	老海寺林场 13zk10	46.83	14.64	11.99	8.55	1.83	9.1	7.01	1.66	2.59	0.2	0.18	3.19	99.22
LHS-10-6	中粒辉绿岩	老海寺林场 13zk10	47.24	13.35	13.47	8.6	2.25	7.98	7.4	0.91	3.49	0.24	0.2	3.03	99.56
LHS-10-8	中粒辉绿岩	老海寺林场 13zk10	46.79	14.3	11.79	7.56	1.77	10.97	6.84	0.72	2.8	0.19	0.18	3.05	99.4
ML-c-3	粗粒辉绿岩	吴庄东南采石场	47.03	13.87	12.87	8.76	1.9	10.07	6.86	0.82	3	0.19	0.2	2.71	99.52
ML-c-4	粗粒辉绿岩	吴庄东南采石场	49.12	13.76	14.68	9.86	2.25	4.63	5.79	1.2	4.58	0.35	0.19	2.94	99.49
ML-c-6	辉绿岩	吴庄东南采石场	47.48	14.45	12.9	9.2	1.85	5.57	8.32	0.62	4.15	0.23	0.29	3.54	99.4
LG008	辉绿玢岩	吴庄东南采石场	47.44	13.6	13.01	8.6	1.87	9.6	6.61	0.89	3.18	0.21	0.19	2.71	99.31
WZ-1	球状辉绿岩	吴庄浅井	45.12	13.46	11.24	6.17	1.43	11.8	8.23	0.26	3.2	0.15	0.17	4.38	99.44
LG001	粗粒辉长岩	吴庄浅井	50.09	11.84	12.93	7.15	1.91	8.11	7.39	0.77	4.21	0.22	0.22	1.83	99.52
LG006	辉长岩	吴庄浅井	45.49	13.99	11.94	4.56	1.76	13.92	4.34	0.083	3.38	0.17	0.14	3.77	98.983
LG015	粗粒辉长岩	老寨山山脚	48.02	13.64	11.57	7.54	1.55	11.3	6.92	1.06	2.58	0.16	0.19	2.35	99.34
LZS-8-i	粗粒辉长岩	老寨山 13zk08	47.29	10.98	19.13	13.34	4.16	5.92	4.84	1.03	3.47	0.37	0.33	2.01	99.53
LZS-8-e	中粗粒辉绿岩	老寨山 13zk08	47.9	13.28	13.1	7.96	2.35	8.01	6.96	1.45	3.32	0.22	0.2	2.71	99.5
LZS-8-g	中粒辉绿岩	老寨山 13zk08	46.86	12.41	15.58	10.09	2.82	6.81	7.11	1.01	3.7	0.3	0.24	2.66	99.5

表3 栏杆辉绿岩的微量元素含量(10⁻⁶)
Table 3 Compositions of trace elements for the diabase in Langan area(10⁻⁶)

送样号	LHS-10-10	LHS-10-6	LHS-10-8	ML-c-3	ML-c-4	ML-c-6	LG008	WZ-1	LG001	LG006	LG015	LZS-8-1	LZS-8-e	LZS-8-g
室内定名	中粒辉绿岩	中粒辉绿岩	中粒辉绿岩	粗粒辉绿岩	粗粒辉绿岩	辉绿岩	辉绿玢岩	球状辉绿岩	粗粒辉长岩	辉长岩	粗粒辉长岩	粗粒石英辉长岩	中粗粒辉绿岩	中粒辉绿岩
采样地点	老海寺林场 13zk10	老海寺林场 13zk10	老海寺林场 13zk10	吴庄东 南采石场	吴庄东 南采石场	吴庄东南 采石场	吴庄东 南采石场	吴庄东 南采石场	吴庄东 南采石场	吴庄东 南采石场	老寨山 山脚	老寨山 13zk08	老寨山 13zk08	老寨山 13zk08
Li	42.6	36.9	23.8	30.9	32	76.3	24	53.8	41.3	14.9	13.6	18.4	35.8	35.1
Be	0.73	0.53	0.44	0.41	0.69	0.34	0.48	0.48	0.33	0.6	0.33	1.31	0.62	0.69
Rb	28.4	14.1	15.5	17.1	21.9	15.6	27	9.27	14.9	1.71	49.4	16	29.1	16.5
Sr	524	155	490	248	162	706	331	616	465	223	423	141	200	108
Nb	10.2	9.03	7.26	8.02	11.8	10.1	9.04	5.83	6.38	6.89	4.83	21.8	9.69	12.8
Mo	0.62	0.56	0.48	0.47	0.52	0.38	0.47	0.24	0.28	0.54	0.27	1.5	0.5	0.58
Cd	0.15	0.059	0.078	0.26	0.085	0.07	0.36	0.082	0.088	0.17	0.17	0.29	0.13	0.1
Sn	1.03	0.67	0.59	0.92	1.56	0.82	1.05	0.59	1.04	1	0.73	2.23	0.8	1.01
Cs	0.88	0.3	0.63	0.51	0.44	0.67	0.59	24.1	8.97	0.11	0.64	0.23	0.6	0.2
Ba	341	260	283	382	343	565	479	96.3	323	14.7	261	371	713	310
Ta	0.79	0.7	0.61	0.66	1.06	0.75	0.87	0.46	0.52	0.49	0.48	1.43	0.58	1.01
W	0.26	0.29	0.33	0.2	0.5	0.28	0.33	0.19	0.2	0.55	0.2	0.48	0.3	0.41
Pb	2.39	1.63	1.88	12.1	1.3	2.09	6.18	2.38	1.42	4.99	2.41	1.89	4.17	2.26
Bi	0.027	0.018	0.041	0.039	0.038	0.027	0.016	0.053	0.029	0.037	0.02	0.01	0.033	0.017
Th	1.87	1.39	1.09	1.87	2.44	1.67	2.15	1.23	1.21	1.13	0.75	3.46	1.72	2.19
U	0.37	0.34	0.23	0.32	0.53	0.38	0.4	0.21	0.25	0.3	0.15	0.57	0.31	0.42
Sc	34.2	39.4	43.9	38.5	27.7	35.1	38.6	39.8	42.9	36.9	41.3	32.2	39.7	42.9
V	295	354	332	331	279	316	337	275	331	346	317	216	370	467
Cr	129	49.7	235	163	175	153	175	185	97.1	38.1	78.1	2.66	85.6	17.4
Co	51.1	47.5	49.7	51.6	43.4	50.2	51.8	46.7	42.4	32.8	44.8	38.9	46.4	56.1
Ni	77	44	62.9	58.8	17.7	75.7	57.6	83	39.1	37.6	45.4	2.58	42.4	30.4
Cu	82.4	85.6	84	86.8	63.8	85.7	95.4	76.9	106	48.4	98.1	20.7	94.6	90.4
Zn	67.7	92.2	76.8	92.6	68.8	97.6	102	61	84.5	55.3	65.9	127	85.8	106
Ga	16.5	17.6	17.3	16.8	19.9	16.3	18.3	15.2	12.2	21.9	15.4	19.5	16.7	20.9
Zr	105	108	80.7	103	147	97.1	116	63	87	83.4	65.3	216	111	144
Hf	1.9	1.8	1.2	1.2	2.8	1.7	1.8	1.2	1.1	1.3	1.2	3	1.8	2.4
La	14.2	13.9	10.8	12.1	20.1	11.4	17.9	8.68	11.7	10.6	7.49	28.3	14.7	18.5
Ce	35.7	32.8	21.7	25.6	55.6	27.3	34.8	15.2	21.9	21.9	19.4	67.5	28.9	38
Pr	4.6	3.83	3.46	4.02	6.74	4.05	4.49	2.59	3.58	3.62	3.04	9.48	3.97	5.33
Nd	21.4	18.5	15.4	19.2	28.8	19.7	20.6	11.3	15.2	14.6	14	41.9	19.1	23
Sm	4.98	4.83	3.9	4.61	6.29	4.67	5.19	3.2	3.99	4.17	3.68	9.26	4.62	5.75
Eu	1.71	1.76	1.49	1.74	2.33	1.54	2.11	1.34	1.6	1.64	1.46	3.25	1.83	2.55
Gd	4.44	5.4	4.43	4.91	7.85	5.18	5.77	3.75	5.46	4.69	4.21	10.3	5.62	6.83
Tb	0.81	0.96	0.71	0.96	1.27	0.89	1.05	0.76	0.88	0.83	0.69	1.86	0.93	1.39
Dy	5.31	5.44	4.23	5.92	7.5	5.02	5.9	4.4	5.18	4.82	4.49	10.6	4.83	8.07
Ho	1.03	1.1	0.83	1	1.39	0.99	1.14	0.92	1.1	0.98	0.9	1.96	0.98	1.59
Er	2.77	2.91	2.47	2.89	3.76	2.68	3.16	2.39	2.73	2.77	2.41	5.74	2.83	4.09
Tm	0.48	0.44	0.39	0.47	0.63	0.44	0.52	0.38	0.5	0.46	0.4	0.91	0.45	0.64
Yb	2.78	2.78	2.3	2.75	3.78	2.62	3.13	2.58	3.14	2.88	2.6	5.58	2.59	4.04
Lu	0.42	0.4	0.36	0.41	0.54	0.4	0.51	0.4	0.49	0.39	0.39	0.9	0.37	0.61
Y	28.8	26	21.6	23.1	38.7	26.6	24.2	20.5	22.9	25.2	22.9	46.8	22.3	34.6
ΣREE	129.43	121.05	94.07	109.68	185.28	113.48	130.47	78.39	100.35	99.55	88.06	244.34	114.02	154.99
LREE	82.59	75.62	56.75	67.27	119.86	68.66	85.09	42.31	57.97	56.53	49.07	159.69	73.12	93.13
HREE	46.84	45.43	37.32	42.41	65.42	44.82	45.38	36.08	42.38	43.02	38.99	84.65	40.90	61.86
LREE/HREE	1.76	1.66	1.52	1.59	1.83	1.53	1.88	1.17	1.37	1.31	1.26	1.89	1.79	1.51

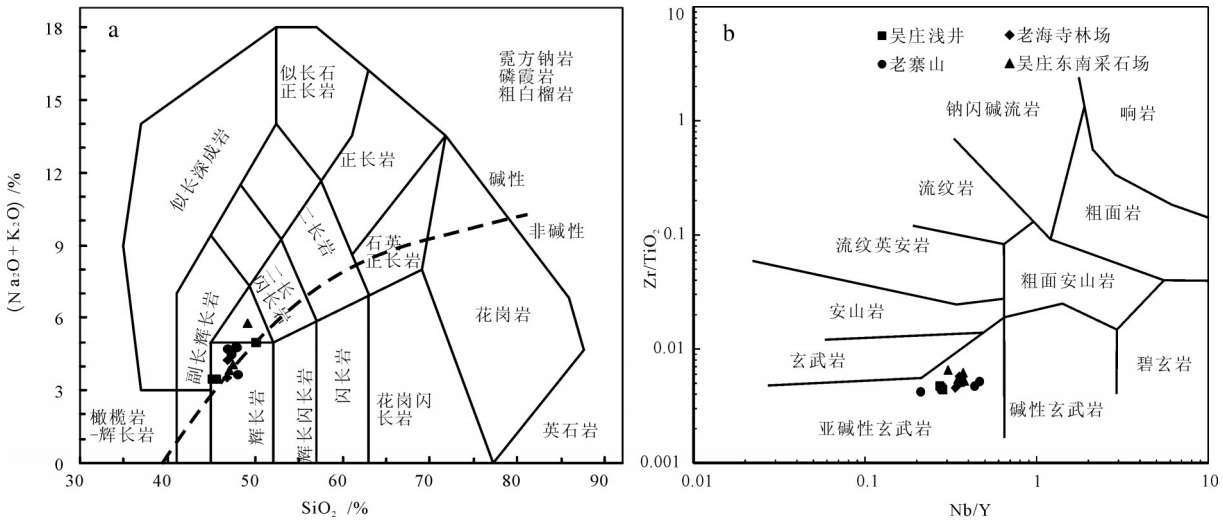


图6 辉绿岩 SiO₂-(Na₂O+K₂O)(a)和Nb/Y-Zr/TiO₂图解(b)(据 Le Bas et al., 1986)
 Fig.6 SiO₂-(Na₂O+K₂O) (a) and Nb/Y-Zr/TiO₂ (b) diagrams for the diabase (after Le Bas et al., 1986)

图解显示了岩浆来源于过渡型地幔(图10)。王清海等(2011)对徐淮地区锆石的Hf同位素研究表明,其Hf模式年龄均大于其形成年龄,但并不远大于其形成年龄,表明辉绿岩原始岩浆不是来源于亏损地幔,亦非富集型地幔,而是中元古代时期的过渡型地幔或略富集型地幔。同时也暗示了该地区存在地幔柱作用。

微量元素的Zr/Y-Zr图解显示该辉绿岩形成于板内向岛弧过渡的环境(图11a),栏杆地区辉绿岩的主量元素在K₂O-TiO₂-P₂O₅图上的投影(图11b)属于板内大陆边缘向大洋过渡环境下形成的玄武岩系列岩石。这与其围岩为大陆边缘浅海沉积环境的分析结果一致,表明其形成于华北陆块东南缘的板内陆缘环境,结合辉绿岩的锆石U-Pb定年结果(870~890 Ma),证明华北陆块东南缘新元古代早期处于大陆伸展环境,并存在新元古代早期的构造热岩浆事件,这就为该区辉绿岩将上地幔的金刚石带出地表创造了条件。

除金伯利岩和钾镁煌斑岩之外,目前最新认识认为辉绿岩也可以作为金刚石的含矿母岩。比如:在澳大利亚东部的金刚石砂矿区附近的碱性玄武岩里找到了金刚石;俄罗斯乌拉尔地区的金刚石砂矿,被认为可能来自于乌拉尔碱性玄武岩类(张培元,1998a;张培元,1998b);在雅库特地区产金刚石的Udachnaya等岩筒中均发现了多种含金刚石的地幔捕虏体,其中就包括有基性岩过渡特征的辉石岩

(Spetsius, 1995; Sobolev et al., 1998; 孙主等, 2012)。1986年在叙利亚西北大马士革北约150 km处叙利亚地堑西侧的两个含金刚石的岩管已被证实不是金伯利岩或者钾镁煌斑岩,而是类似碱性辉长岩或碧玄岩类岩石,并有开采价值;在捷克的Ceske-Stredhori的含镁铝榴石基性火山岩,被看作是该地区冲积金刚石的来源(Kopecky, 1960)。以上发现都证实了金伯利岩和钾镁煌斑岩并不是金刚石的唯一成矿母岩,并为今后在中国其他类型的岩石中,尤其是东部辉绿岩中寻找金刚石矿产提供了依据。

6 结论

(1)安徽栏杆地区辉绿岩中锆石晶形大多不完整,镜下多显示半透明或者不透明,板状。SHRIMP U-Pb年龄测试结果比较分散,但斜锆石的年龄和锆石峰值年龄集中在870~890 Ma,表明该地区辉绿岩形成于新元古代早期,并且辉绿岩作为该地区广泛发育的新元古代岩浆岩将金刚石带出地表。

(2)该区辉绿岩属于板内碱性玄武岩系列岩石,且形成于华北陆块东南缘的板内陆缘环境。其稀土元素总量相对较低,略富轻稀土元素(LREE),Eu显示较弱正异常。总体上富集大离子亲石元素(LILE))Rb、Ba、La,略亏损高场强元素(HFSE)Th、Nb、Ta、Zr、Hf等,相对富集Cr和Ni。Zr-Y、Zr-Nb和Th-Ta-La/Yb暗示其原始岩浆起源于中元古代时

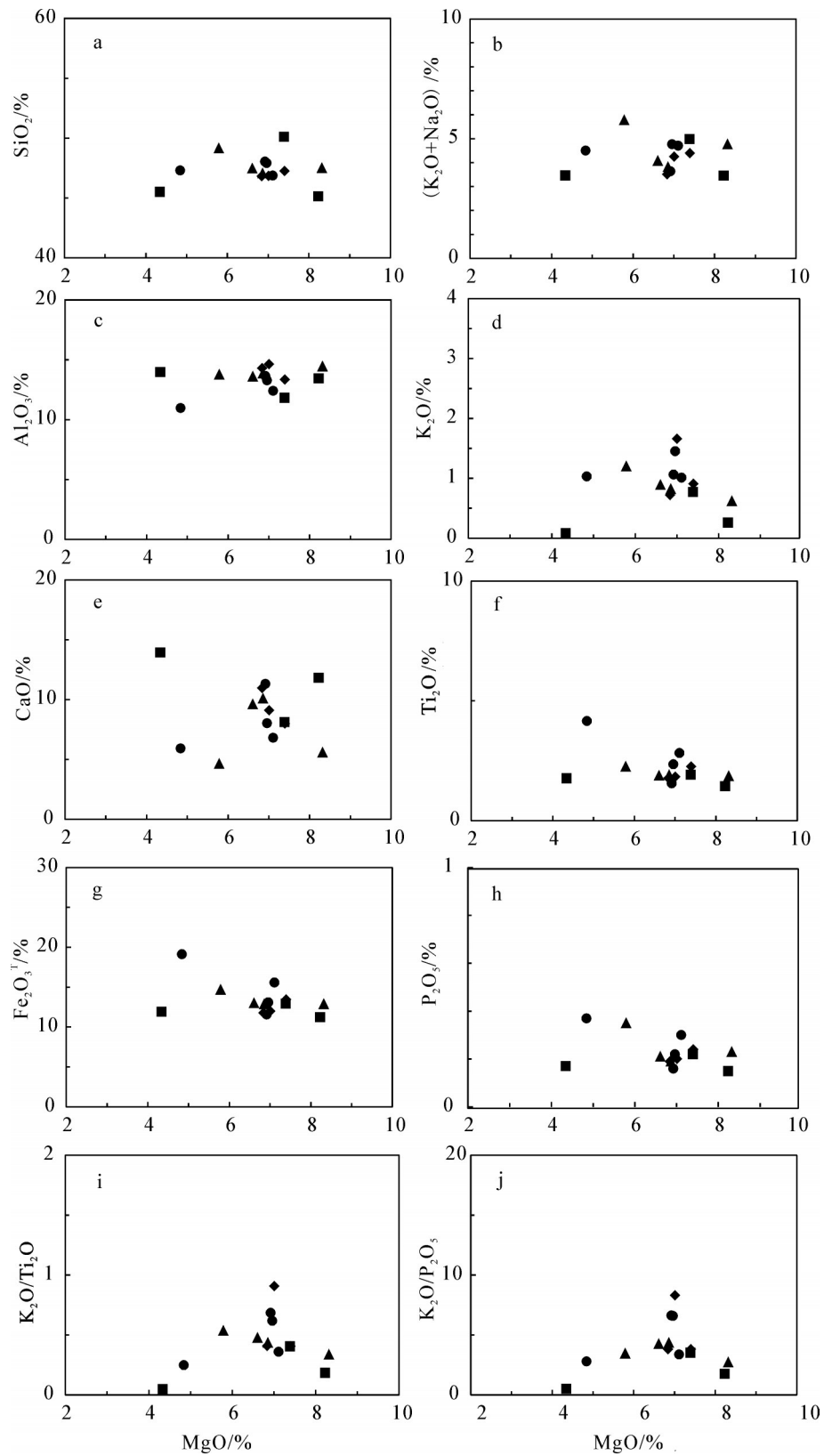


图7 栏杆地区辉绿岩主量元素Harker图解
Fig.7 Harker diagrams for the diabase of Langan area

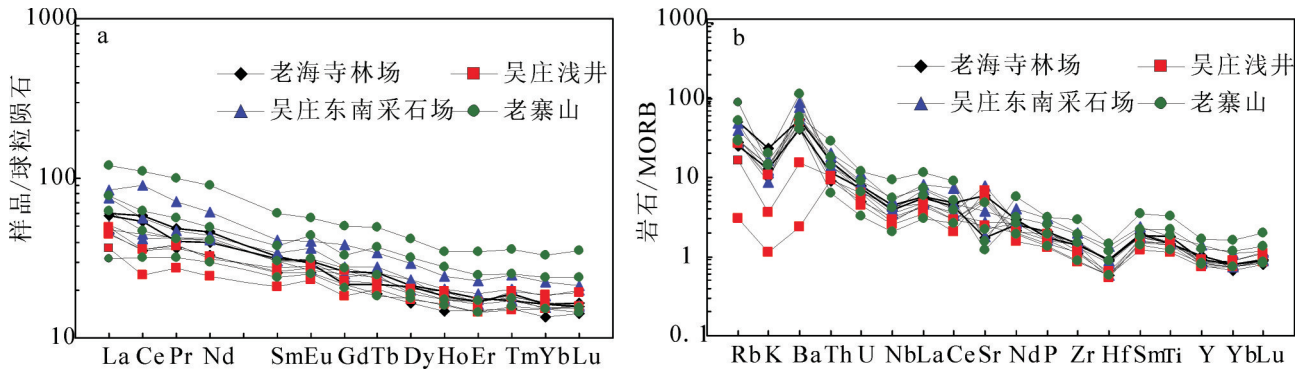


图8 辉绿岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a)及微量元素MORB标准化蛛网图(b)

Fig.8 Chondrite-normalized REE distribution patterns(a) and MORB-normalized trace elements spider gram (b) for the diabase

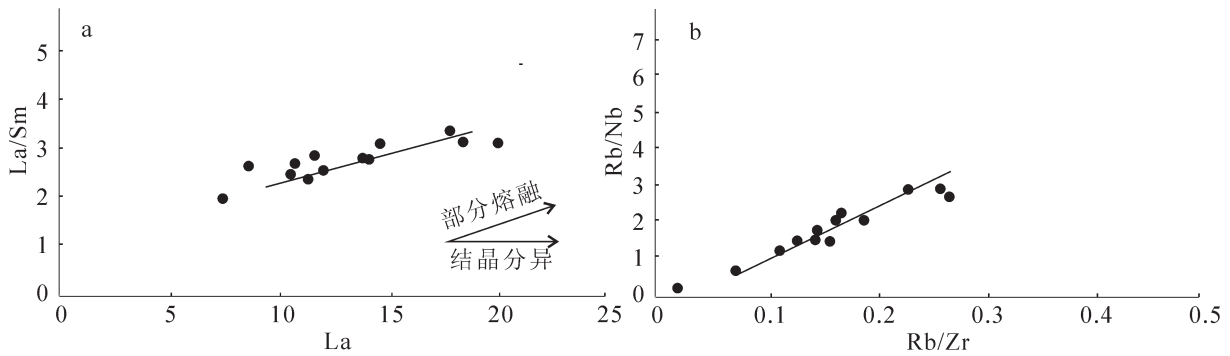


图9 辉绿岩La-La/Sm及Rb/Zr-Rb/Nb图解

Fig.9 La-La/Sm and Rb/Zr-Rb/Nb diagrams for the diabases in Langan area

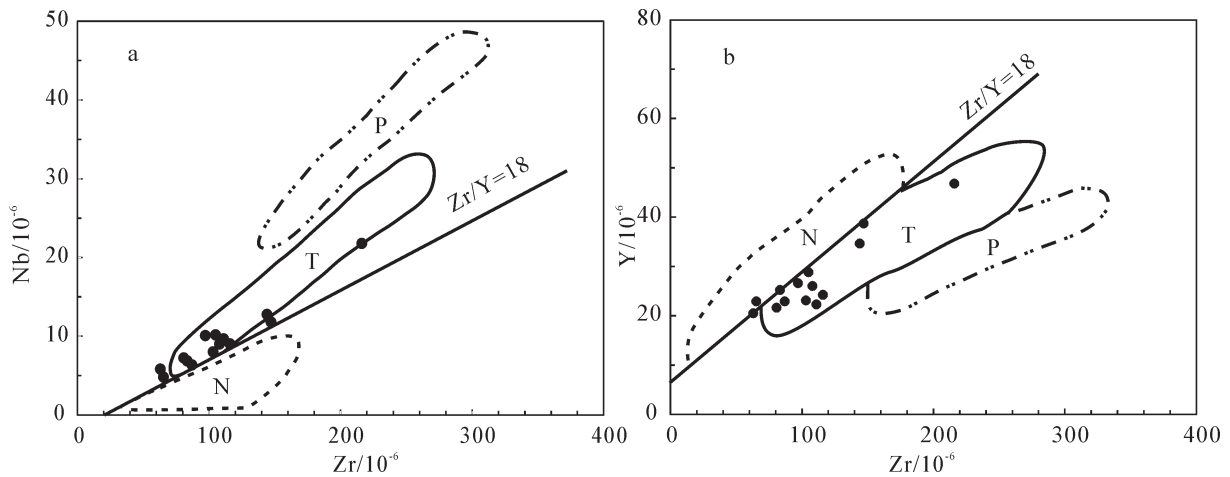


图10 栏杆地区辉绿岩Zr-Nb(a)和Zr-Y(b)判别图解(Le Roex et al.,1983)

P—富集型地幔;N—亏损型地幔;T—过渡型地幔

Fig.10 Zr-Nb(a) and Zr-Y(b) diagrams for the diabases in Langan area

P-Enrichment mantle; N-Depleted mantle; T-Transitional mantle

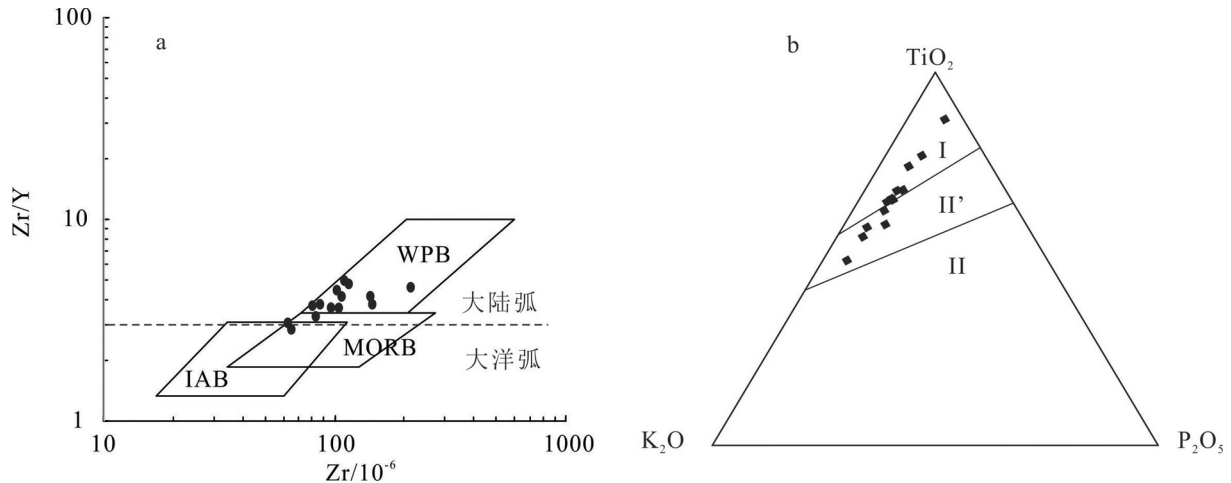


图 11 栏杆辉绿岩构造判别(a)及 $K_2O-TiO_2-P_2O_5$ 图解(b)(Pearce et al., 1979; Wood, 1980; Meschede, 1986)

a—WPB:板内玄武岩;MORB:洋中脊玄武岩;IAB:岛弧玄武岩

b— I :大洋环境玄武岩类; II :大陆碱性玄武岩; II' :大陆拉斑玄武岩

Fig.11 Tectonic discriminant diagram (a) and $K_2O-TiO_2-P_2O_5$ diagram (b) for the diabase in Langan area(Pearce et al., 1979; Wood, 1980; Meschede, 1986)

a—WPB: within-plate basalt, MORB: mid-ocean ridge basalt, IAB: island-arc basalt, b- I : ocean basalt, II : continental alkali basalt, II' : continental tholeiite

期的过渡型地幔。皖北地区新元古代辉绿岩墙群应该为地幔柱作用。

References

- Black L P, Gulson B L. 1978. The age of the mud tank carbonatite, strangways range, Northern Territory [J]. *Bmr Journal of Australian Geology and Geophysics*, 3(3): 227-232.
- Cai Y T, Chen G G, Zhang J, Dong Z D, Zhou S W. 2014. Geochemical features of the olivine-gabbros and its relationship with diamond-forming in the Langan area, Anhui Province [J]. *Resources Survey & Environment*, 35(4):245-253(in Chinese with English abstract).
- Chen H, Qiu Z L, Lu T J, Richard S, Thomas S, Sun Y, Zhang J, Ke J, Peng S Y, Qin S C. 2013. Variations in carbon isotopic composition in the subcontinental lithospheric mantle beneath the Yangtze and north China cratons: Evidence from in-situ analysis of diamonds using SIMS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(4):355-364 (in Chinese with English abstract).
- Fedortchouk Y, McIsaac E. Surface Dissolution Features on Kimberlitic Chromites as Indicators of Magmatic Fluid and Diamond Quality [C]//Pearson D, et al(eds.). *Proceedings of 10th International Kimberlite Conference*. Springer, New Delhi New Delhi: Springer India, 2013:297-308.
- Fu Z. 1993. Characteristics and origin of diamond and its indicating minerals in Sihong, Chengang area, Jiangsu[J]. *Jiangsu Geology*, 17(3/4):174-179(in Chinese with English abstract).
- Huang X J. 2012. Study on primary diamond deposit types and analysis of the prospect of exploration of diamond resources in Anhui Province[J]. *Geology of Anhui*, 22(2):103-105(in Chinese with English abstract).
- Jagoutz E, Palme H, Baddenhausen H, Blum K, Cendales M, Dreibus G, Spettel B, Waenke H, Lorenz V. 1979. The abundances of major, minor and trace elements in the earth's mantle as derived from primitive ultramafic nodules[C]. *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, 2031-2050.
- Kogarko L N, Ryabchikov I D. 2013. Diamond potential versus oxygen regime of carbonatites [J]. *Petrology*, 21(4): 316-335.
- Kopecky L. 1960. Diamond prospects in the Czech Massif. *Izvestiia akademii nauk SSSR, Ser.[J]. Geology*, 12: 46-55.
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. *Journal of Petrology*, 27(3): 745-750.
- Le Roex A P, Dick H J B, Erlank A J, Reid A M, Frey F A, Hart S R. 1983. Geochemistry, mineralogy and petrogenesis of lavas erupted along the southwest Indian ridge between the bouvet triple junction and 11 degrees east[J]. *Journal of Petrology*, 24(3): 267-318.
- Li Y. 2010. The distribution of resources and environment and the construction of commonweal geologic work system in northeast China[J]. *Geology and Resources*, 19(2):119-123(in Chinese with English abstract).
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the

- Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 56(3): 207-218.
- Onuma N, Ninomiya S, Nagasawa H. 1981. Mineral/groundmass partition coefficients for nepheline, melilite, clinopyroxene and perovskite in Melilite-Nepheline basalt, Nyiragongo, Zaire[J]. *Geochemical Journal*, 15(4): 221-228.
- Pearce J A, Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(1): 33-47.
- Qi Y X, Shi Z, Han Z G. 1998. The prospecting and exploration of diamond deposits in Liaoning[J]. *Liaoning Geology*, (2):111-125 (in Chinese with English abstract).
- Rong H, Yang J S, Zhang Z, Xu X. 2013. A preliminary study of FT-IR on the diamonds from the Luobusa chromitites of Tibet and the eclogite of CCSD-MH, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1861-1866(in Chinese with English abstract).
- Sobolev N V, Taylor L A, Zuev V M, Bezbzorodov S M, Snyder G A, Sobolev V N, Yefimova E S. 1998. The specific features of eclogitic paragenesis of diamonds from Mir and Udachnaya kimberlite pipes (Yakutia)[J]. *Geologiya i Geofizika*, 39(12): 1667-1678.
- Song B. 2015. SHRIMP zircon U-Pb age measurement: Sample preparation, measurement, data processing and explanation [J]. *Geological Bulletin of China*, 34(10):1777-1788(in Chinese with English abstract).
- Spetsius Z V. 1995. Occurrence of diamond in the mantle: A case study from the siberian platform[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 53(3): 25-39.
- Sun Z, Mo M, Qiu Z L, Liang W, Wang P. 2012. Diamond and diamond industry of Russia[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 14(1):14-23(in Chinese with English abstract).
- Treuil M, Joron J L. 1975. Utilisation des éléments hygromagmatophiles pour la simplification de la modélisation quantitative des processus magmatiques. exemples de l'afar et de la dorsale médioatlantique[J]. *Society Italian Mineral Petrology*, 31: 125-174.
- Wang Q H, Yang D B, Xu W L. 2011. Neoproterozoic basic magmatism in the southeast margin of North China Craton evidence from whole-rock geochemistry, U-Pb and Hf isotopic[J]. *Science China: Earth Science*, 41(6):796-815(in Chinese).
- Wood D A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British tertiary volcanic province[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 11-30.
- Yang J S, Xu X Z, Bai W J, Zhang Z M, Rong H. 2014. Features of diamond in ophiolite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8):2113-2124 (in Chinese with English abstract).
- Yang J S, Xu X Z, Li Y, Li J Y, Ba D Z, Rong H, Zhang Z M. 2012. Diamonds recovered from peridotite of the Purang ophiolite in the Yarlung-Zangbo suture of Tibet: A proposal for a new type of diamond occurrence [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11):3171-3178(in Chinese with English abstract).
- Yao Z. 1986. Concise regional geology of Anhui[J]. *Regional Geology of China*, (4):309-312(in Chinese with English abstract).
- Yin L, Zhang R, Zheng J. 2008. Mineral chemistry characters of diamond inclusions and the nature of the lithospheric mantle beneath the eastern north China craton[J]. *Geological Science and Technology Information*, 27(5):21-28(in Chinese with English abstract).
- Yin Z W, Lu F X, Chen M, Xu H Y. 2005. Ages and environments of formation of diamonds in Mengyin County, Shandong Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(4): 614-622(in Chinese with English abstract).
- Zhang J, Cai Y T, Dong Z D, Ma Y G, Fan F P, Chen L Z, Li C K, Yang D W. 2015. Investigation on mineral characteristic of diamond and geochemical characteristic of its host in the Langan area, Anhui Province[J]. *Journal of Gems and Gemology*, 17(5):1-11(in Chinese with English abstract).
- Zhang P Y. 1998a. Actively explore a new type diamond primary deposit[J]. *Management on Geological Science and Technology*, 15(5):1-8(in Chinese with English abstract).
- Zhang P Y. 1998b. New knowledge of some important questions about diamond deposit genesis[J]. *Hunan Geology*, 17(3):204-210(in Chinese with English abstract).
- Zhao J J, Li J, Wang S, Dai J. 2011. The regional ore-controlling conditions and prediction of resources potential of the diamond concentrated district in Wafangdian, Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 20(1):40-44(in Chinese with English abstract).
- Zhu L X. 1992. Characteristics of Sinian and Cambrian diamondiferous in Jiangsu, Shangdong, Anhui Province[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 22(2):150-155(in Chinese with English abstract).
- Zhuang J X. 2013. Study of magnetic anomaly features and its implications for diamond exploration in the Langan-Chualan area, Suzhou city[J]. *Geology of Anhui*, 23(2):123-125(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

蔡逸涛, 陈国光, 张洁, 董钟斗, 周世文. 2014. 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, 35(4): 245-253.
- 陈华, 丘志力, 陆太进, Richard Stern, Thomas Stachel, 孙媛, 张健, 柯捷, 彭淑仪, 秦社彩. 2013. 扬子克拉通及华北克拉通大陆岩石圈地幔碳同位素组成及其差异: 金刚石碳同位素原位测试证据[J]. 科学通报, 58(4): 355-364.
- 付长江. 1993. 泗洪、城岗地区金刚石及其指示矿物特征和供源方向[J]. 江苏地质, 17(3/4): 174-179.
- 黄先觉. 2012. 金刚石原生矿床类型及安徽省金刚石找矿前景分析[J]. 安徽地质, 22(2): 103-105.
- 李月新. 2010. 辽南瓦房店地区袁家沟金刚石原生矿找矿前景分析[J]. 地质与资源, 19(2): 119-123.
- 齐玉兴, 施中爽, 韩柱国. 1998. 辽宁金刚石矿找矿与勘查[J]. 辽宁地质(2): 111-125.
- 戎合, 杨经绥, 张仲明, 徐向珍. 2013. 西藏罗布莎橄榄岩与中国大陆科学钻探主孔(CCS-D-MH)榴辉岩中金刚石的红外特征初探[J]. 岩石学报, 29(6): 1861-1866.
- 宋彪. 2015. 用SHRIMP测定锆石U-Pb年龄的工作方法[J]. 地质通报, 34(10): 1777-1788.
- 孙主, 莫默, 丘志力, 梁伟章, 王萍. 2012. 俄罗斯的金金刚石及其产业发展[J]. 宝石和宝石学杂志, 14(1): 14-23.
- 王清海, 杨德彬, 许文良. 2011. 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.
- 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[J]. 岩石学报, 30(8): 2113-2124.
- 杨经绥, 徐向珍, 李源, 李金阳, 巴登珠, 戎合, 张仲明. 2012. 西藏雅鲁藏布江缝合带的普兰地幔橄榄岩中发现金刚石: 蛇绿岩型金刚石分类的提出[J]. 岩石学报, 27(11): 3171-3178.
- 姚仲伯. 1986. 安徽省区域地质概要[J]. 中国区域地质(4): 309-312.
- 殷莉, 张瑞生, 郑建平. 2008. 金刚石包裹体矿物化学特征与华东北部克拉通岩石圈地幔属性[J]. 地质科技情报, 27(5): 21-28.
- 尹作为, 路凤香, 陈美华, 徐红宾. 2005. 山东蒙阴金刚石的形成时代及地质环境[J]. 地学前缘, 12(4): 614-622.
- 张洁, 蔡逸涛, 董钟斗, 马玉广, 范飞鹏, 陈乐柱, 李成凯, 杨迪威. 2015. 安徽栏杆金刚石矿物特征及其寄主母岩地球化学特征研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 17(5): 1-11.
- 张培元. 1998a. 积极探索突破新类型金刚石原生矿床[J]. 地质科技管理, 15(5): 1-8.
- 张培元. 1998b. 有关金刚石成因等若干重大问题的新认识[J]. 湖南地质, 17(3): 204-210.
- 赵建军, 李靖, 王书, 戴军. 2011. 辽宁瓦房店金刚石矿集区区域成矿控制条件及资源潜力预测[J]. 地质与资源, 20(1): 40-44.
- 朱连兴. 1992. 鲁、苏、皖震旦系寒武系含金金刚石砾岩特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 22(2): 150-155.
- 庄继翔. 2013. 宿州市栏杆-褚栏地区金刚石勘查中磁异常特征研究与找矿[J]. 安徽地质, 23(2): 123-125.