邱磊,张凯涵,周琦忠,等. 苏北地区辉绿岩床群岩石成因及原生金刚石成矿潜力.吉林大学学报(地球科学版),2026,56(4):1264-1279. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240347.

Qiu Lei, Zhang Kaihan, Zhou Qizhong, et al. Petrogenesis and Primary Diamond Mineralization Potential of Dolerite Sills in Northern Jiangsu Region. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2026,56(4):1264-1279. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240347.

苏北地区辉绿岩床群岩石成因及原生金刚石成矿潜力

邱 磊[1],张凯涵[2],周琦忠[1],张 琪[1],王国强[1], 罗 跃[1],王 博[1],范明森[2]

1.江苏省地质局第五地质大队,江苏 徐州 221000

2.南京大学地球科学与工程学院,南京 210023

摘要:苏北地区位于华北克拉通东南缘,是潜在的优质原生金刚石找矿靶区。毗邻苏北的栏杆地区辉绿岩中虽已发现大量I_b型原生金刚石,但苏北地区的金刚石勘探工作仍无重大突破。辉绿岩的岩石成因缺乏系统研究,原生金刚石成矿潜力尚未深入探讨,限制了进一步的勘探部署。本研究系统分析了苏北地区两个含金刚石岩体和四个具有勘探潜力岩体的地球化学特征,并与栏杆地区的老寨山辉绿岩进行对比。结果表明:含金刚石和不含金刚石的辉绿岩地球化学特征无显著差异,均为拉斑系列亚碱性玄武岩,形成于大陆板内环境;两类岩体普遍富集大离子亲石元素(如Rb、Ba、La、Eu)和高场强元素(如Nb、U、Nd、Ti);部分含金刚石的辉绿岩可能经历了轻微地壳混染,但混染程度较低;源区性质指向过渡型地幔,稀土和微量元素特征介于OIB(洋岛玄武岩)和E-MORB(富集型洋中脊玄武岩)之间,推测为地幔柱成因,此类辉绿岩的源区深度通常为60~140 km,与I_b型金刚石的稳定深度相符,表明苏北地区辉绿岩在理论上具备作为金刚石载体的条件;辉绿岩中寻找原生金刚石矿床仍面临挑战,结合团队先前研究发现,此类I_b型原生金刚石在地幔中存留时间相对较短,处于初生阶段即被带出金刚石稳定区而停止生长,总体经济价值有限。后续勘探重点应转向金伯利岩或钾镁煌斑岩类的目标岩体。

关键词:苏北地区;辉绿岩床群;新元古代;原生金刚石矿;成矿潜力

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240347 **中图分类号**:P581;P619.24 **文献标志码**:A

Petrogenesis and Primary Diamond Mineralization Potential of Dolerite Sills in Northern Jiangsu Region

Qiu Lei[1], Zhang Kaihan[2], Zhou Qizhong[1], Zhang Qi[1], Wang Guoqiang[1], Luo Yue[1],

收稿日期:2024-12-23

作者简介:邱磊(1993—),男,工程师,硕士,主要从事地质矿产勘查方面的研究,E-mail:838405146@qq.com

通信作者:范明森(1989—),男,助理研究员,博士,主要从事矿床学方面的研究,E-mail:fmsnju2016@163.com

基金项目:江苏省地质局科技创新项目(2023KY07,2021KY09);江苏省自然科学基金项目(BK20242019);江苏省地质局地质勘查项目(苏地矿发[2023]77号,苏地矿发[2022]83号)

Supported by the Science and Technology Innovation Project of Jiangsu Geological Bureau (2023KY07,2021KY09), the Natural Science Foundation Project of Jiangsu Province (BK20242019) and the Geological Exploration Project of Jiangsu Geological Bureau (Su Di Kuang Fa [2023]77, Su Di Kuang Fa [2022]83)

Wang Bo[1], Fan Mingsen[2]

1. *The Fifth Geological Bridge of Jiangsu Geological Bureau, Xuzhou* 221000, *Jiangsu, China*

2. *School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing* 210023, *China*

Abstract: The northern Jiangsu region, located on the southeastern margin of the North China craton, is a potential target for primary diamond exploration. Although numerous I_b-type diamonds have been discovered in the dolerite of the Langan area, Anhui, no significant breakthrough has been made in diamond exploration in northern Jiangsu. The petrogenesis of these dolerites and their primary diamond mineralization remain poorly understood, which hampers further exploration. This study systematically analyzed the geochemical characteristics of two diamond-bearing and four potentially diamond-bearing dolerite samples from northern Jiangsu, and compared them with the diamond-bearing dolerite from Laozhaishan in the Langgan area. The results show that there are no significant geochemical differences between diamond-bearing and non-diamond-bearing dolerites. Both are tholeiitic sub-alkaline basalts formed in an intraplate setting, enriched in large-ion lithophile elements (e.g., Rb, Ba, La, Eu) and high-field-strength elements (e.g., Nb, U, Nd, Ti). Some diamond-bearing dolerites may have experienced minor crustal contamination, but its effect is limited. The source characteristics indicate a transitional mantle origin, with rare-earth and trace-element patterns intermediate between OIB and E-MORB, suggesting a plume-related origin. The estimated source depth is typically 60 – 140 km, consistent with the stability depth of I_b-type diamonds, suggesting that the dolerite in northern Jiangsu could serve as a suitable host rock for diamonds. However, the search for primary diamond deposits in dolerite remains challenging. Based on previous research, I_b-type primary diamonds have a relatively short residence time in the mantle. Once they are transported out of the diamond stability field during their early formation, their growth ceases, resulting in limited economic value. Future exploration should therefore more on locating kimberlites or lamproites.

Key words: northern Jiangsu region; dolerite sill swarms; Neoproterozoic; primary diamond deposit; mineralization potential

0　引言

金刚石是碳元素在高压环境下形成的稳定物相，是目前已知硬度最高的天然矿物。因其密度大、硬度高、强度大以及出色的耐磨和耐酸碱性能，在工业领域得到了广泛应用，素有“工业牙齿”之称。天然金刚石的形成条件非常苛刻，其寄主岩石主要为金伯利岩、钾镁煌斑岩、蛇纹石化科马提岩、超基性煌斑岩和蛇绿岩型地幔橄榄岩等深源火成岩和超高压变质岩[1-8]。近年来，我国在安徽栏杆地区的金刚石勘探方面取得了突破性进展，安徽省地勘局第二水文工程地质勘查院从该地区的辉绿岩中选获了近 3 000 颗原生金刚石，这是我国首次在基性岩中发现金刚石[9-11]。朱仁智等[12]进一步对栏杆地区的金刚石开展了形态学、拉曼光谱和红外光谱的研究，揭示了这些 I_b 型金刚石的形成可能与新元古代基性岩浆作用事件密切相关。江苏西北部的徐州地区与安徽栏杆地区毗邻，该区域内的新元古代沉积岩中也广泛分布着辉绿岩床(墙)群，其产状、成岩年代及地球化学特征与栏杆地区非常相似[10, 13-15]，在一定程度上表明苏北地区同样具有巨大的原生金刚石找矿潜力。自 2013 年起，江苏省地质矿产局第五地质大队针对苏北徐州中部地区的辉绿岩体开展了系统的金刚石原生矿调查与普查，在张集大沟里及贾汪北许阳两地的辉绿岩中发现了 2 颗原生金刚石，这些金刚石粒径介于 0.2～0.3 mm 之间，类似于安徽栏杆地区发现的金刚石，同属 I_b 型[16]。苏北徐州地区为潜在的优质金刚石找矿靶区，然而该地区金刚石容矿辉绿岩的系统研究却相对匮乏，尚不能对找矿靶区内含金刚石与不含金刚石的岩体进行有效区分，这极大地限制了进一步勘探的工作部署。本研究对苏北徐州地区的两个含金刚石岩体(张集大沟里和贾汪北许阳)及四个具有勘探潜力的岩体(牛蹄山、吴桥、马头山和阚山)进行了全岩主量元素、微

量元素和稀土元素组成分析,并与安徽栏杆地区老寨山的含金刚石辉绿岩体开展对比研究,旨在全面揭示苏北地区广泛出露的辉绿岩床(墙)群的岩石成因、源区特征和大地构造背景,为该地区的金刚石找矿工作提供关键线索。

1 区域地质特征

研究区位于华北克拉通东部陆块的东南边界(图1a),毗邻郯庐断裂带,基底为新太古界泰山岩群变质杂岩,上覆新元古界—古生界。其中,新元古界青白口系土门群为最古老沉积盖层,与下伏泰山岩群呈不整合接触。震旦系为陆表海沉积地层,自下而上依次为碎屑岩、碳酸盐岩和碎屑岩组合。新元古代末期的徐淮上升运动导致该区局部沉积间断。寒武系—中奥陶统为碳酸盐岩夹碎屑岩组合,主要分布于徐州复式背斜和向斜的核部及翼部,构成苏北地区主要山脉。

苏北地区褶皱和断裂发育复杂,印支期和燕山期是主要的褶皱活动时期。研究区位于郯庐断裂带西侧的徐州—宿州弧形断褶带的内弧和过渡区域,发育多组轴向渐转的复式褶皱。区域内主要发育NE、NNE、NW和近EW向断裂,具有多期活动的特征,其中NNE-NE向断裂规模最大,影响最显著。岩浆活动与断裂带有关,岩石类型从超基性至酸性均有发育,可划分为三个阶段:元古宙以基性辉绿岩为主;中生代以中酸性侵入岩为主,主要岩体有利国、班井和桃林岩体;新生代以橄榄玄武岩、煌斑岩、金伯利岩和安山玢岩等脉岩为主,受NW、NNE向断裂控制呈脉状展布。苏北地区新元古代辉绿岩分布广泛,大部分基性岩床隐伏于第四系之下,仅约1/5的岩体出露地表。岩体的规模差异较大,其中燕子埠岩体最大,出露面积达16.5 km^2,岩体长度一般为数十米到数千米,最长可达16 km,宽度从数米至数百米不等,最宽可达1 km。大多数岩体呈NE向岩床状产出,少数为岩墙或岩脉状,集中分布于铜山东部至邳州西部。围岩为新元古代碳酸盐岩和碎屑岩,辉绿岩侵入层位从青白口系土门群至震旦系望山组,岩床多呈板层状或楔状顺层侵入,围岩普遍大理岩化、蛇纹石化,局部夕卡岩化。

苏北地区是我国金刚石原生矿A类成矿远景区。自20世纪60年代以来,该地区第四系松散层中累计发现金刚石200余颗,并在新沂地区查明1处小型金刚石砂矿床。2010年以来,毗邻苏北的安徽栏杆地区在原生金刚石找矿工作中取得重大突破,于老寨山辉绿岩体内圈定2处辉绿岩型原生金刚石矿体,累计提交金刚石资源量约25万ct[①]。受此成果的推动,苏北地区启动了新一轮金刚石找矿工作,先后在北许阳、大沟里地区的辉绿岩体中选获原生金刚石各1颗,在白露山地区的橄榄玄武岩等碱性基性岩体中发现原生金刚石4颗,并在徐州铜山地区圈定4处金伯利岩。但截至目前,苏北地区尚未发现具工业价值的含矿金伯利岩或规模化的金刚石矿床。

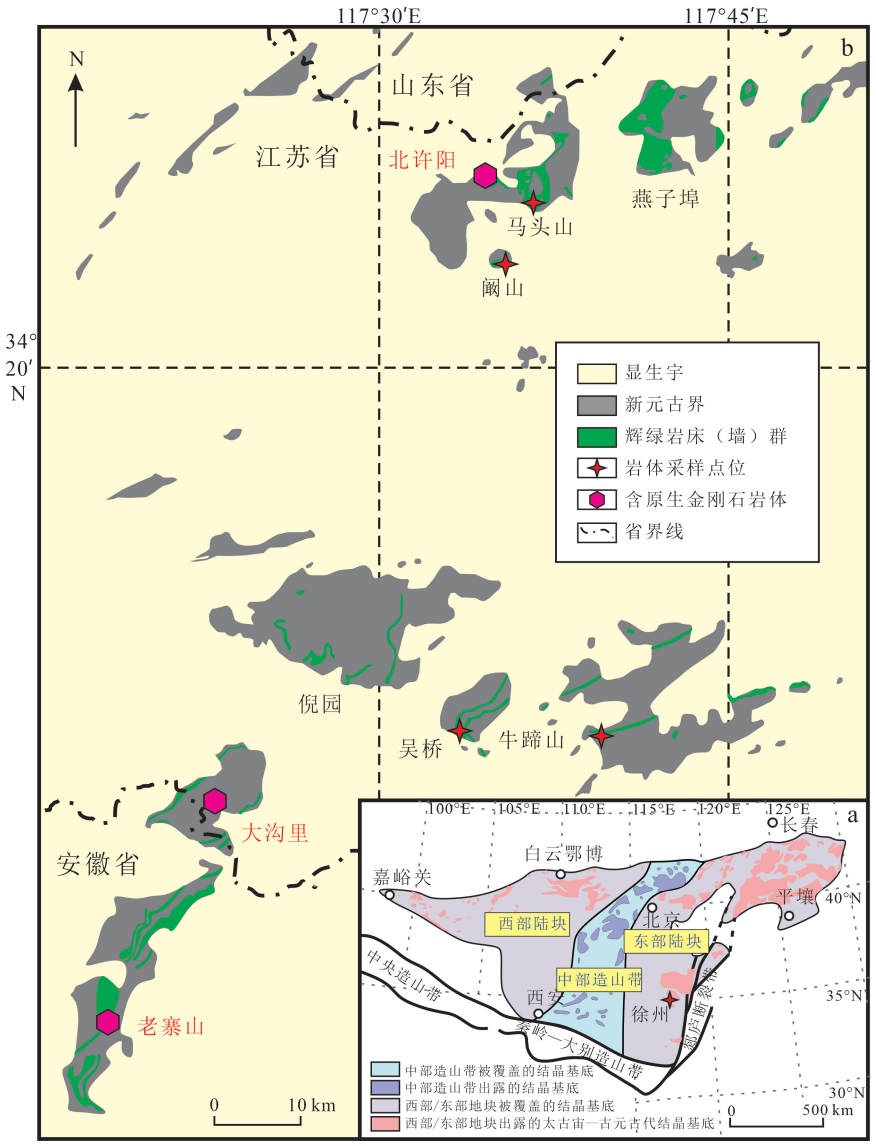
2 样品采集及岩相学特征

本研究在江苏徐州地区采集了6个具有代表性的辉绿岩体样品,分别来自北许阳、大沟里、吴桥、牛蹄山、马头山和阚山岩体(图1b)。其中:北许阳岩体和大沟里岩体为隐伏岩体,均曾发现过原生金刚石,为苏北地区最典型的载原生金刚基性岩体;吴桥、牛蹄山、马头山和阚山岩体代表了苏北地区具找矿潜力的辉绿岩体,采集的新鲜样品可用于开展详细的对比研究(图2)。

北许阳隐伏岩体位于贾汪区许阳村北,由4个钻孔控制,呈椭圆形,长约1 200 m,宽600 m,顺层侵入至震旦系倪园组(Zn)灰质白云岩中,岩体顶面距地表5.22~31.19 m,单孔辉绿岩厚度在97.95~186.04 m之间,岩相分带不明显。岩石具典型辉绿结构,主要由斜长石(55%)、单斜辉石(40%)以及少量的钾长石和铁钛氧化物组成。其中,斜长石为自形—半自形板状,因发生强烈的黏土化,聚片双晶难以识别,呈网架状分布;单斜辉石多呈他形粒状,粒径为0.2~0.5 mm,填充于斜长石框架之间,不透明金属矿物主要为铁钛氧化物(图2d)。

大沟里隐伏岩体位于铜山区张集镇大沟里村,钻孔揭露岩体厚度大于70.21 m,呈岩床状顺层侵入至震旦系望山组厚层灰岩中,地磁异常表明岩体呈NW向脉状展布,长约500 m,宽为100~200 m。显微镜下可见典型的辉绿结构,矿物组成主要为斜长石(50%)、单斜辉石(35%)及后期蚀变矿物绿泥石、碳酸盐矿物、长英质矿物以及铁钛氧化物(15%),部分绿泥石和后期长英质矿物集合体呈浑

① ct(克拉)为非法定计量单位,1 ct=0.2 g。



自文献[15] 修改。

图 1　华北克拉通地质简图(a)和苏北地区侵入新元古代地层中的辉绿岩床(墙)分布图(b)

Fig.1　Geologic schematic map of North China craton (a) and distribution of the dolerite sill swarms intruding into Neoproterozoic strata in northern Jiangsu region (b)

圆状，直径可达 1 mm 及以上，推测其为蚀变矿物充填气孔的杏仁体(图 2g)。

吴桥岩体出露于铜山区单集镇吴桥—牌坊—前石山一带，岩体总体走向 65°，长度约 17 km，宽为 0.15～0.70 km，呈顺层状侵入至倪园组灰岩中。岩体地表风化强烈，风化后颜色呈灰黄色—黄色，呈蜂窝状或球状，节理发育，多被钙质或长英质矿物充填(图 2c)。岩体内部岩相分带较为明显，矿物颗粒由中心向两侧边部逐渐变细，表现出渐变过渡的特征，不同岩相的过渡关系较为清晰。局部可见绿帘石化、硅化现象，接触带围岩蚀变主要表现为大理岩化，局部伴有蛇纹石化和褐铁矿化。岩石呈暗绿色，风化后常为浅绿—浅黄色，斜长石呈半自形板状、板条状，粒径部分为 2～4 mm 的中粒，部分为 0.5～2.0 mm的细粒，杂乱并搭成格架状分布，后期多具黏土化、绢云母化、绿泥石化、少硅化，少量隐约可见聚片双晶(图 2h)。单斜辉石呈他形粒状，杂乱分布于斜长石间，构成辉绿结构，部分后期多具次闪石化、绿泥石化、褐铁矿化，少量被次生黑云母交代。



a. 牛蹄山辉绿岩野外产状照片;b. 马头山辉绿岩野外产状照片;c. 吴桥辉绿岩球状风化;d—i. 北许阳、马头山、阚山、大沟里、吴桥和牛蹄山辉绿岩正交偏光显微结构照片。Cpx. 单斜辉石;Pl. 斜长石;Qz. 石英;Chl. 绿泥石;Ab. 钠长石。

图2 苏北地区辉绿岩床的野外及显微结构照片

Fig.2 Field photos and photomicrographs of dolerite in the the northern Jiangsu region

牛蹄山岩体位于铜山区单集镇牛蹄山附近,出露于采坑内,呈岩床状侵入倪园组薄层灰岩,上接触带围岩呈水平产状(图2a)。牛蹄山辉绿岩中可见明显的粗粒相和细粒相,二者矿物组成相似,主要包括单斜辉石(45%)和斜长石(40%),少量钾长石、角闪石、石英和不透明矿物。辉绿岩样品发育典型的岛状辉绿结构,可见辉石呈孤立状充填于斜长石构成框架间隙中,少量斜长石隐约可见聚片双晶,后期多发生黏土化、绢云母化和绿帘石化(图2i)。

马头山岩体出露于贾汪区汴塘镇马头山一带,呈近SN向岩床侵入至震旦系倪园组(图2b),岩体南北长度约6.4 km,东西最宽处约1 km。该岩体在空间上受推覆构造控制,内部存在大小不等的倪园组捕虏体,使得岩体内部结构较为复杂并多失去连续性,岩体中心部分为粗—中粒结构,边缘为细粒或中细粒结构。

阚山岩体位于马头山岩体附近,出露于汴塘镇东阚山近山顶处,宕口可见其长约80 m,宽为8～10 m,呈岩床状侵入至震旦系九顶山组(Zjd),围岩为灰白色大理岩化灰岩。马头山岩体内部多见纵向裂隙,辉绿矿物组成与区域内其他典型岩体类似,普遍存在蛇纹石化、绿泥石化,少量高岭土化现象(图2e),该岩体是坡洪积型-风化壳型钛铁矿、夕卡岩型铁矿的成矿母岩。阚山辉绿岩总体来说蚀变较弱,半自形短柱状,宽为0.5～2.0 mm,构成岛状框架,可见典型的聚片双晶(图2f)。

3 分析方法与测试结果

3.1 分析方法

苏北地区17件辉绿岩样品主量元素、微量元素及稀土元素分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成。为降低潜在的污染风

险,首先去除样品表层,再从其内部取约 150 g 小块。随后,利用玛瑙钵将选定的岩石样品研磨成 200 目的细粉用于全岩地球化学分析。烧失量(LOI)通过减重法测定,选取一定量的岩石粉末,放置于含 95%铂和 5%金的坩埚中,在 1 000 ℃的高温下燃烧超过 3 h。烧失量的计算公式为:$f_{LOI}=100(m_0+m_1-m_2)/m_1$,其中,$m_0$为坩埚质量,g;$m_1$为加入坩埚的原始样品质量,g;$m_2$为 1 000 ℃烧失处理后残留样品和坩埚的总质量,g。

主量元素分析采用 X 射线荧光光谱法(XRF)。前处理使用熔融法制作玻璃熔片,助熔剂为 $Li_2B_4O_7$、$LiBO_2$和 LiF,按质量比 45∶10∶5 混合,NH_4NO_3为氧化剂,LiBr 为脱模剂,在 1 050 ℃下熔融 15 min。XRF 测定使用 Thermo Scientific ARL 9900 型号仪器,工作电压为 40 kV,电流为 70 mA。通过对约 40 种标准物质进行双变量回归,建立了定量校准曲线,涵盖了多种硅酸盐成分。质量分数>1%的元素分析精度优于±3%,质量分数≤1%的元素分析精度约为±5%。

微量元素和稀土元素分析使用 Finnigan MAT-Element II 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)。前处理包括:1)将 50 mg 200 目岩石粉末在 105 ℃下烘干 12h;2)用 1.0 mL 超纯 HF 和 1.0 mL HNO_3溶解粉末,置于高压聚四氟乙烯溶样弹中;3)将溶样弹放入钢护套并在 195 ℃下加热 72 h;4)将溶液稀释至 100 mL。使用 GSR-1 和 GSR-3 作为标准物质,并引入含铑(Rh)的内标溶液以监测信号漂移。质量分数高于 50×10^{-6}的元素分析精度超过±5%,低于 50×10^{-6}的元素分析精度约为±10%。

3.2　地球化学测试结果

苏北地区 6 个典型辉绿岩体的全岩主量、微量和稀土元素分析结果如表 1 所示。辉绿岩样品的烧失量范围为 1.97%~4.34%,大部分样品较为新鲜,只有少量样品出现轻微蚀变。样品的 SiO_2质量分数为 44.72%~48.73%,总碱(K_2O+Na_2O)质量分数为 2.83%~5.99%,所有样品中 $w(Na_2O)$均高于 $w(K_2O)$。Al_2O_3的质量分数为 12.04%~13.68%,TFe_2O_3质量分数为 12.44%~17.27%,CaO 质量分数为 5.80%~9.92%,TiO_2质量分数为 1.91%~4.74%,MgO 质量分数为 4.62%~7.19%,$Mg^{\#}$值为 0.37~0.52。苏北地区辉绿岩体普遍呈贫硅、富铁、富钛的特征,在 $w(SiO_2)-Zr/TiO_2$判别图(图 3a)中,所有样品均位于亚碱性玄武岩区域[17],而在 $w(TFeO)-w(Na_2O+K_2O)-w(MgO)$判别图(图 3b)中,这些样品进一步被划分为拉斑玄武岩[18]。与安徽栏杆地区含原生金刚石的老寨山辉绿岩体相比[15],苏北地区样品在主量元素成分及岩石类型上基本一致。

稀土元素总量(ΣREE)较低(72.93×10^{-6}~214.17×10^{-6}),轻稀土元素与重稀土元素的比值(LREE/HREE)为 5.16~9.72,$(La/Yb)_N$值为 2.51~6.38。稀土元素的球粒陨石标准化配分曲线表现出右倾特征(图 4),显示轻稀土元素富集,而重稀土元素亏损,绝大部分样品未见明显 Eu 异常,少数样品有轻微的 Eu 正异常,可能与少量斜长石斑晶有关。从微量元素原始地幔标准化蛛网图可见,辉绿岩样品中普遍富集大离子亲石元素(如 Rb、Ba、La、Eu)及部分高场强元素(如 Nb、U、Nd、Ti),但部分样品显示 Nb、Zr、Th 等高场强元素的亏损(图 4)。大沟里、北许阳和老寨山等含原生金刚石的辉绿岩体表现出明显的 Sr 弱正异常(图 4d),而苏北地区其他具原生金刚石找矿潜力的辉绿岩体则表现出 Sr 负异常(图 4b)。然而,通过分析本研究辉绿岩的 Sr 质量分数与烧失量关系,未发现两者之间存在显著相关性,表明斜长石及其他矿物的蚀变对辉绿岩 Sr 质量分数的影响可以基本排除。

4　讨论

4.1　岩石成因

镁铁质基性岩床群是深部岩浆快速侵入上地壳的产物,基性岩浆上升过程通常伴随弱交代作用,可能混染地壳成分。在研究岩石成因和源区特征之前,需要首先评估地壳混染的程度。通过微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4b),发现苏北地区具有原生金刚石找矿潜力的辉绿岩体多表现出 Sr 负异常,表明斜长石分离结晶在岩浆演化中发挥了重要作用;而含原生金刚石的辉绿岩体(如大沟里、北许阳和老寨山)表现出 Sr 弱正异常(图 4d),且大沟里岩体表现出较明显的 Nb 负异常,暗示这些岩体在侵入过程中可能受到一定的地壳污染[21-22]。高场强元素(如 Nb、Zr、Hf、Ta 等)质量分数通常不受地幔部分熔融或玄武质岩浆分离结晶的影响,但对地壳物质的加入较为敏感,因为岩石圈地幔岩浆与地壳物质之间的成分差异显著[23-24]。除大沟里岩体 HZK05-H1样品(Zr/Hf=54.4)外,苏北及安徽栏

表1 苏北地区辉绿岩床群的主量、微量及稀土元素组成

Table 1 Major, trace and rare earth element of the dolerite sill swarms in northern Jiangsu region

岩性	岩体名称	样品编号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	烧失量	总和	$Mg^{\#}$	Rb	Sr
含原生金刚石辉绿岩体	北许阳	ZK01-H1	45.55	3.59	13.49	14.85	0.23	6.07	8.77	2.58	1.15	0.66	2.86	99.80	0.45	23.2	444
		ZK02-H2	46.29	3.77	12.50	14.62	0.25	5.02	9.20	2.75	1.63	0.70	3.06	99.78	0.40	18.5	438
		ZK04-H3	44.72	3.79	13.14	15.12	0.25	7.09	6.21	2.79	1.61	0.74	4.34	99.80	0.48	13.9	326
		ZK06-H1	44.80	4.74	12.48	15.41	0.24	4.73	9.53	2.94	1.06	0.70	3.17	99.81	0.38	12.7	275
	大沟里	ZK02-H1	46.95	1.91	12.40	12.97	0.22	7.19	9.29	3.01	1.37	0.21	3.87	99.39	0.52	28.1	327
		ZK03-H1	46.97	2.15	13.52	12.44	0.19	6.61	9.32	3.02	0.85	0.21	4.02	99.30	0.51	33.3	359
具有原生金刚石找矿潜力的辉绿岩体	阚山	ZK08-H1	45.47	3.39	12.43	15.88	0.26	7.18	6.55	2.76	1.49	0.53	3.87	99.80	0.47	51.3	423
		ZK09-H1	48.73	3.44	12.94	14.19	0.23	4.85	5.80	3.84	2.15	0.74	2.97	99.86	0.40	46.3	151
	马头山	XZK06-H1	46.15	3.63	13.68	15.06	0.23	5.70	8.81	2.76	1.12	0.70	1.97	99.81	0.43	21.6	356
	吴桥	SH-H1	48.29	2.90	12.57	15.10	0.23	6.00	9.48	2.31	0.52	0.22	2.24	99.87	0.44	14.5	234
		YPⅢ-H2	46.39	3.49	12.04	17.27	0.24	5.57	8.37	2.46	0.75	0.23	3.01	99.83	0.39	17.5	212
		ZK04-H2	47.22	3.10	12.40	15.69	0.24	5.95	9.92	2.31	0.58	0.22	2.23	99.86	0.43	20.6	263
		ZK04-H3	48.27	2.75	12.90	14.22	0.23	5.79	8.61	3.00	0.83	0.28	3.00	99.87	0.45	25.3	270
	牛蹄山	ZK05-H1	48.20	3.40	12.26	15.57	0.24	4.62	8.35	3.13	0.56	0.33	3.23	99.90	0.37	19.2	189
		ZK05-H2	48.61	2.62	13.68	13.28	0.21	5.37	9.13	2.98	0.93	0.25	2.85	99.90	0.44	26.9	220
		ZK05-H3	48.48	2.72	13.01	13.98	0.22	5.70	8.85	2.90	0.79	0.27	2.97	99.87	0.45	25.2	288
		HS-H1	46.81	3.64	13.09	14.53	0.24	5.09	8.11	3.01	1.16	0.59	3.57	99.84	0.41	27.6	336

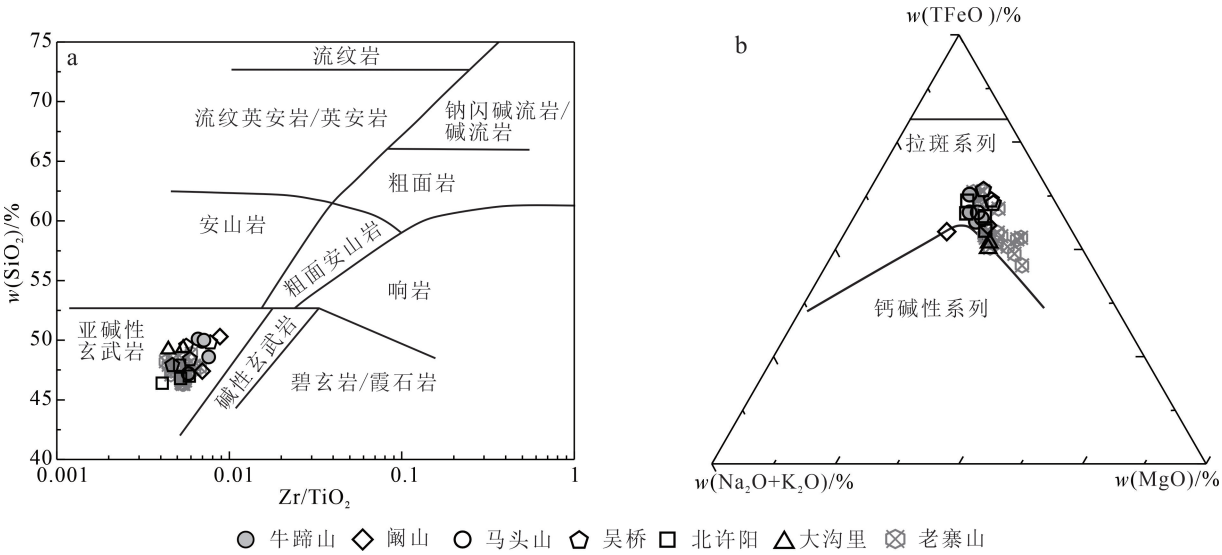
岩性	岩体名称	样品编号	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm
含原生金刚石辉绿岩体	北许阳	ZK01-H1	37.4	217	26.9	1.24	498	5.65	1.62	3.12	2.58	0.51	35.6	61.7	8.19	37.2	8.09
		ZK02-H2	36.3	201	31.5	0.73	665	5.30	2.03	7.32	2.97	0.63	28.3	56.6	9.80	41.0	8.59
		ZK04-H3	35.0	207	32.8	1.36	589	5.17	1.84	4.79	2.31	0.53	27.7	55.7	9.70	42.7	8.46
		ZK06-H1	39.1	200	33.5	0.43	501	5.15	1.94	3.08	3.17	0.51	29.9	59.4	10.50	46.3	9.41
	大沟里	ZK02-H1	25.4	89	9.3		254	2.10					10.5	21.4	3.31	15.3	4.00
		ZK03-H1	26.9	122	12.2		134	2.80					12.2	26.2	4.06	18.1	4.71

续表 1

岩性	岩体名称	样品编号	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm
具有原生金刚石找矿潜力的辉绿岩体	阚山	ZK08－H1	37.2	246	27.5	2.34	368	6.38	1.62	4.83	4.10	0.73	35.9	60.0	7.77	33.7	7.44
		ZK09－H1	37.7	313	34.1	0.64	342	8.00	2.00	2.97	5.02	0.94	43.9	75.2	9.89	43.5	9.28
	马头山	XZK06－H1	37.3	215	26.6	0.68	456	5.39	1.60	3.47	2.24	0.50	33.4	57.4	7.79	34.8	7.75
	吴桥	SH－H1	31.1	167	14.8	1.31	147	5.11	0.82	7.22	2.32	0.43	15.0	34.3	4.94	21.9	5.38
		YPⅢ－H2	31.5	169	14.2	1.49	185	5.32	0.97	2.17	2.11	0.49	15.1	33.3	4.75	23.4	5.87
		ZK04－H2	37.0	188	16.9	1.16	133	5.32	0.91	2.27	2.59	0.51	14.2	34.0	5.02	23.2	5.98
		ZK04－H3	41.1	220	19.6	0.86	146	6.39	1.08	1.16	3.32	0.63	18.2	42.7	6.25	28.3	7.24
	牛蹄山	ZK05－H1	44.4	245	19.3	1.30	81	7.07	1.18	1.30	3.72	0.70	19.5	46.2	6.76	30.8	7.76
		ZK05－H2	32.7	178	15.6	1.18	126	5.20	0.87	1.15	2.49	0.50	14.8	34.2	5.07	23.0	5.81
		ZK05－H3	37.7	200	17.4	1.69	171	5.41	0.90	1.83	2.89	0.58	15.9	36.7	5.35	24.2	6.09
		HS－H1	38.2	287	26.0	0.68	422	8.00	1.76	4.79	5.06	0.94	31.2	67.7	9.28	39.3	8.62

岩性	岩体名称	样品编号	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	$(La/Yb)_N$
含原生金刚石辉绿岩体	北许阳	ZK01－H1	2.97	7.36	1.22	6.82	1.26	3.38	0.49	2.93	0.48	177.69	153.75	61.34	2.51	8.21
		ZK02－H2	3.33	7.69	1.39	7.15	1.47	3.30	0.56	3.94	0.70	173.82	147.62	26.20	5.63	4.85
		ZK04－H3	3.35	7.40	1.38	6.77	1.43	3.12	0.57	3.84	0.61	172.73	147.61	25.12	5.88	4.87
		ZK06－H1	3.58	8.42	1.54	7.98	1.68	3.56	0.63	4.39	0.70	187.99	159.09	28.90	5.50	4.60
	大沟里	ZK02－H1	1.51	3.79	0.78	4.83	1.08	2.82	0.43	2.76	0.42	72.93	56.02	16.91	3.31	2.57
		ZK03－H1	1.57	4.25	0.87	5.17	1.12	2.88	0.44	2.79	0.41	84.77	66.84	17.93	3.73	2.95
具有原生金刚石找矿潜力的辉绿岩体	阚山	ZK08－H1	2.53	6.80	1.17	6.62	1.25	3.36	0.48	2.95	0.47	170.44	147.34	23.10	6.38	8.22
		ZK09－H1	2.95	8.68	1.47	8.35	1.59	4.34	0.64	3.78	0.60	214.17	184.72	29.45	6.27	7.85
	马头山	XZK06－H1	2.83	6.97	1.21	6.74	1.29	3.34	0.47	2.96	0.48	167.43	143.97	23.46	6.14	7.62
	吴桥	SH－H1	1.77	5.14	0.98	5.87	1.09	3.05	0.55	2.79	0.45	103.21	83.29	19.92	4.18	3.63
		YPⅢ－H2	2.05	5.96	1.07	6.99	1.33	3.65	0.60	3.35	0.51	107.93	84.47	23.46	3.60	3.05
		ZK04－H2	2.01	5.72	1.10	6.89	1.29	3.63	0.66	3.37	0.53	107.60	84.41	23.19	3.64	2.85
		ZK04－H3	2.34	6.82	1.30	7.92	1.47	4.14	0.76	3.79	0.61	131.84	105.03	26.81	3.92	3.24
	牛蹄山	ZK05－H1	2.50	7.22	1.37	8.52	1.58	4.38	0.80	4.05	0.64	142.08	113.52	28.56	3.97	3.25
		ZK05－H2	1.91	5.49	1.05	6.43	1.20	3.38	0.61	3.14	0.51	106.60	84.79	21.81	3.89	3.18
		ZK05－H3	2.05	5.67	1.09	6.73	1.24	3.52	0.63	3.18	0.50	112.85	90.29	22.56	4.00	3.38
		HS－H1	2.83	7.73	1.36	7.93	1.42	3.96	0.71	3.53	0.56	186.13	158.93	27.20	5.84	5.97

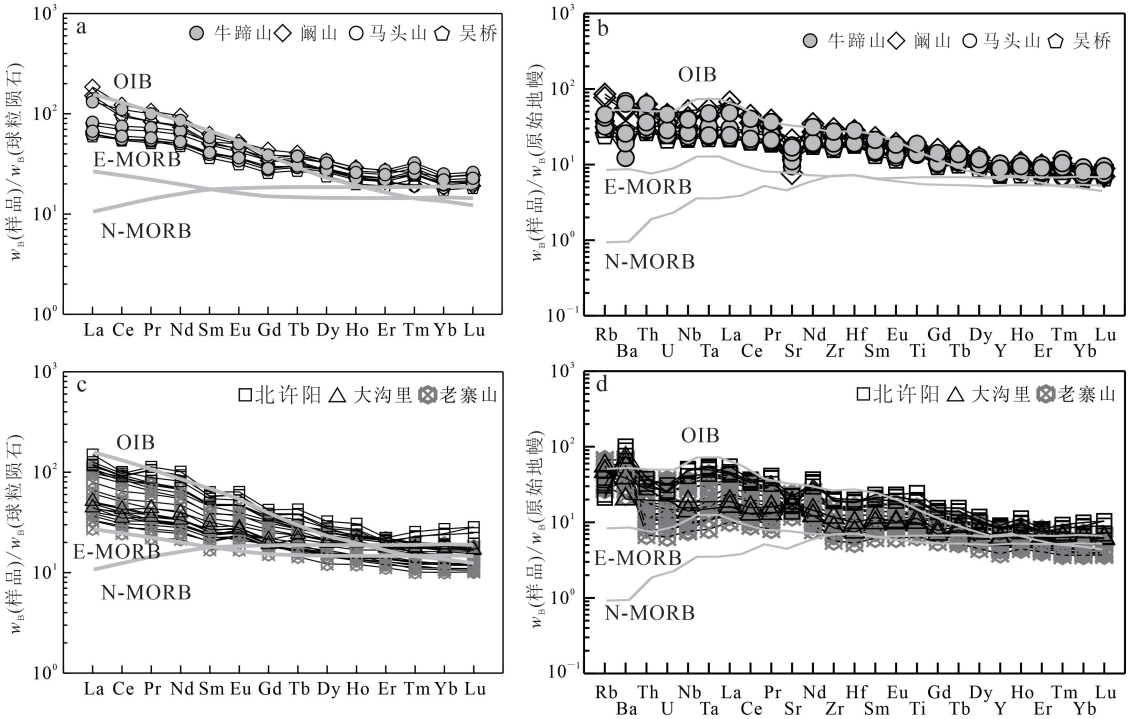
注：主量元素质量分数单位为%；稀土和微量元素质量分数单位为 10^{-6}。



安徽栏杆地区含原生金刚石的老寨山岩体数据据文献[15]。a图据文献[17]修编;b图据文献[18]修编。

图3 苏北地区辉绿岩床群 $w(SiO_2)-Zr/TiO_2$ 岩石分类图解(a)和 $w(TFeO)-w(Na_2O+K_2O)-w(MgO)$ 图解(b)

Fig.3 $w(SiO_2)-Zr/TiO_2$ diagram (a) and $w(TFeO)-w(Na_2O+K_2O)-w(MgO)$ diagram (b) of dolerite sill swarms in northern Jiangsu region



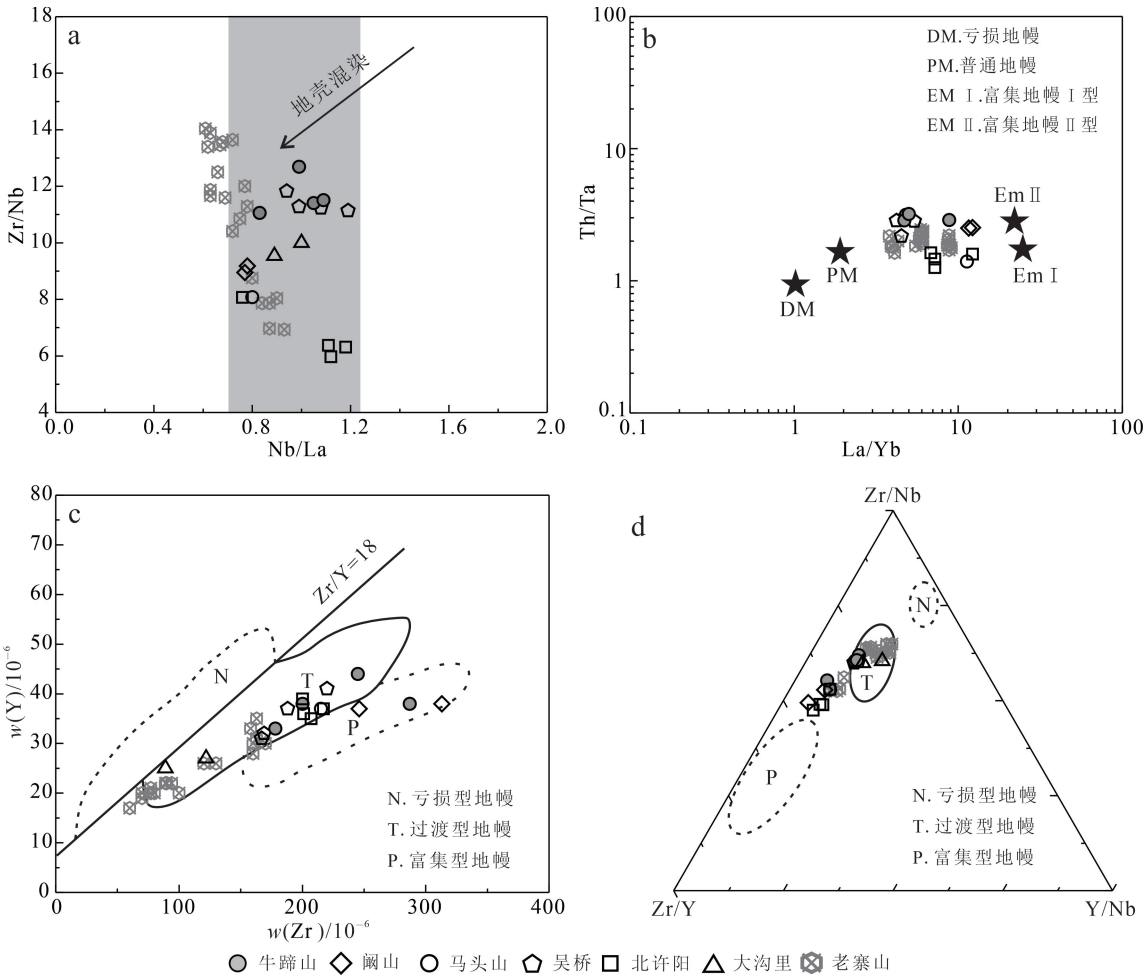
球粒陨石的数据据文献[19];原始地幔的数值据文献[20];安徽栏杆地区含原生金刚石的老寨山岩体数据据文献[15]。OIB.洋岛玄武岩;N-MORB.亏损型洋中脊玄武岩;E-MORB.富集型洋中脊玄武岩。

图4 研究区稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a、c)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b、d)

Fig.4 Chondrite-normalized rare earth element pattern grams (a, c) and primitive mantle-normalized spider grams (b, d) of the study area

杆地区老寨山辉绿岩样品的 Nb/Ta 值（13.0～19.3，平均 16.0）和 Zr/Hf 值（31.7～41.0，平均值为 37.1）变化范围较小，并与洋岛玄武岩（OIB）的比值相似（Nb/Ta＝ 15.9±0.6，Zr/Hf＝36.3）[20]，整体上排除了强烈地壳混染的可能性（图 5）。此外，苏北辉绿岩样品的 Nb/La 值较高（0.73～1.19），明显高于地壳（0.4）[28]，Zr/Nb 与 Nb/La 值也无明显相关性（图 5a），这也与大量地壳物质的混入相矛盾[29]。综上所述，尽管苏北及安徽栏杆地区的含原生金刚石辉绿岩体可能存在一定的地壳混染，但混染程度较低，更不可能是形成辉绿岩群的主要因素。

高场强元素（如 Ti、Zr、Y、Hf、Th、Ta、Nb）及稀土元素（REE）通常不受地壳混染影响，因此是示踪地幔源区特征和岩浆演化的有效指标[15, 30-32]。苏北地区辉绿岩的 Zr/Y 值为 3.5～8.3，显著低于原始地幔（Zr/Y＝18），表明其来源于过渡型地幔（图 5c）[26]。此外，Th/Ta－La/Yb 与 Zr/Nb－Zr/Y－Y/Nb 判别图（图 5b、d）均表明，苏北地区辉绿岩的源区属于过渡型地幔。值得一提的是，具原生金刚石找矿潜力的苏北辉绿岩与安徽栏杆地区老寨山含原生金刚石辉绿岩在源区特征上并无显著差别。Nb/La 值是区分软流圈地幔和大陆岩石圈地幔贡献的重要指标，软流圈地幔衍生的熔体通常具有较高的 Nb/La 值（0.93～1.32）[20]，而大陆岩石圈地幔的 Nb/La 值较低，与大陆地壳相近（0.4）[28]。苏北辉绿岩床群的 Nb/La 值为 0.73～1.19，安徽栏杆地区老寨山辉绿岩的 Nb/La 值为 0.61～0.93[15]，二者并无系统性差异，且均高于大陆岩石圈地幔熔体，接近 OIB 和 MORB（洋中脊玄武岩）的范围，表明这些基性岩浆来自深部地幔。稀土元素球粒陨石标准化



a. Zr/Nb－Nb/La 判别图解；b. Th/Ta－La/Yb 判别图解[25]；c. w(Y)－w(Zr)判别图解[26]；d. Zr/Nb－Zr/Y－Y/Nb 判别图解[27]。

图 5　苏北地区辉绿岩床群判别图解

Fig.5　Diagram of dolerite sill swarms in northern Jiangsu region

配分曲线和微量元素原始地幔标准化蛛网图(图4)进一步显示,苏北辉绿岩的特征介于OIB和E-MORB之间,展现出地幔柱成因玄武岩的典型特征[33]。

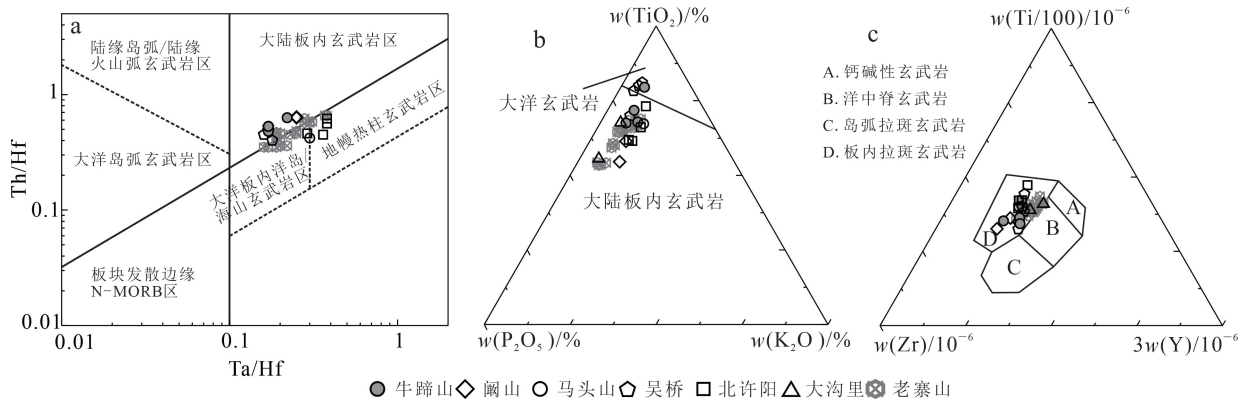
总体而言,苏北地区辉绿岩床群属于拉斑系列的亚碱性玄武岩,地壳混染的影响较小,岩浆源区具有过渡型地幔特征,推测为地幔柱成因的玄武岩。

4.2 构造背景

现有的成岩年代学研究表明,苏北地区的辉绿岩大约形成于962~897 Ma之间[14, 34-36],其年龄与周缘安徽宿州栏杆地区老寨山岩体(913 Ma)[15]和华北克拉通东北缘朝鲜半岛和辽宁大连地区的辉绿岩床(924~886 Ma)[37-38]接近。结合这些辉绿岩体相似的主量元素特征及岩石类型(图3),暗示苏北地区辉绿岩群与华北克拉通同期的基性岩可能属于同期岩浆-构造活动的产物。

如前文所述,高场强元素等非活动性微量元素的含量及其比值通常不受地壳混染、部分熔融和分离结晶等作用的影响,因而能够有效约束基性岩的构造背景[39-41]。以Th、Ta和Hf元素为例,作为强不相容元素,其岩浆亲和性变化是同步的,Ta/Hf和Th/HF值的差异反映了源区成分的差异[42]。统计数据显示,产于大陆环境的玄武岩Th/Ta值通常高于1.6,而大洋环境中的玄武岩该比值低于1.6,反映了大陆岩石圈与大洋地幔成分的差异,这是地球早期大陆地壳分离的结果,而地幔柱成因的玄武岩通常具有较大范围的Th/Ta值变化,但Ta/Hf通常大于3[41, 43-45]。在Th/Hf-Ta/Hf构造判别图中(图6a),苏北牛蹄山、阚山和吴桥岩体的Th/Ta值均大于1.6,表明其属于大陆板内玄武岩,而栏杆地区老寨山岩体的Th/Ta值约为1.6,在该图中未能明确区分其构造背景。此外,马头山和北许阳岩体则落入地幔热柱玄武岩区域(图6a),支持了之前关于其地幔柱成因的推测。更多区域性的地质证据同样支持苏北地区辉绿岩可能属于地幔柱成因。例如,Peng等[37]通过对比发现,华北克拉通东部的朝鲜半岛、栾川盆地、旅大盆地和徐淮盆地具有相似的沉积序列,这表明其可能隶属同一新元古代裂谷系统。该裂谷系统以徐淮盆地为中心,在华北克拉通向西延伸至河南栾川盆地,向东北延展至旅大—朝鲜半岛区域,可能属于地幔柱作用引发的裂谷-裂谷-裂谷"三联结"构造的一部分。此外,这些区域普遍发育约900 Ma的辐射状基性岩群,且地球化学特征高度相似,表明华北克拉通东部在新元古代可能存在地幔柱活动[14-15, 35, 37]。值得注意的是,地幔柱成因并不指示特定的板块构造类型,而是反映了其岩浆源区较深。进一步的$w(TiO_2)$-$w(P_2O_5)$-$w(K_2O)$三元判别图(图6b)[40]和$w(Ti/100)$-$w(Zr)$-$3w(Y)$三元判别图(图6c)[39]也对苏北和栏杆地区辉绿岩的构造环境进行了分析,结果表明绝大多数辉绿岩属于大陆板内玄武岩。

综上所述,苏北地区的辉绿岩群与安徽宿州栏杆地区的老寨山辉绿岩体均形成于大陆板内环境,结合其新元古代的成岩年代,明确了华北克拉通东南缘在新元古代早期处于大陆岩石圈伸展环境。区域内广泛的新元古代构造-岩浆活动可能响应了



a. Th/Hf-Ta/Hf构造判别图解[41];b. $w(TiO_2)$-$w(P_2O_5)$-$w(K_2O)$构造判别图解[40];c. $w(Ti/100)$-$w(Zr)$-$3w(Y)$构造判别图解[39]。

图6 苏北地区辉绿岩床群构造图解

Fig.6 Diagram of dolerite sill swarms in northern Jiangsu region

Rodinia 超大陆的裂解[14-15, 37]。同时，区域内大规模的基性岩浆活动为从地幔深处携带金刚石至地表提供了有利条件。

4.3　苏北地区原生金刚石找矿潜力探讨

华北克拉通是我国最重要的原生金刚石矿床产地，金伯利岩是其主要载体，集中分布在山东蒙阴和辽宁瓦房店[46-50]。近年来，在安徽栏杆地区基性岩钻孔和老寨山辉绿岩体中选获大量原生金刚石晶体，这是我国首次在基性岩中发现原生金刚石，为华北克拉通的金刚石找矿提供了新契机[12, 16, 50-51]。尽管苏北地区在金刚石找矿方面取得了一些进展，但与栏杆地区相比，苏北仅发现少量原生金刚石，规模差异显著。基于苏北地区辉绿岩的岩石成因及构造背景，并结合团队对原生金刚石特征及成因的研究成果[12, 16, 51]，本节对苏北地区原生金刚石找矿的潜力和面临的问题进行了深入探讨。

安徽栏杆地区和苏北地区辉绿岩中赋存的原生金刚石在特征和成因上较为一致。其粒径主要集中在 0.20～0.35 mm 之间，呈淡黄色—黄色，晶形多为八面体和菱形十二面体，表面有溶蚀痕迹，少见三角蚀像或三角生长丘[12, 16]。拉曼光谱分析显示，这些金刚石在 1 332 cm^{-1} 处出现典型的金刚石峰，红外光谱显示总体 N 体积分数较低，平均为 172.9×10^{-6}，在 1 130 cm^{-1} 处出现红外峰，而 1 282 cm^{-1} 和 1 175 cm^{-1} 峰未出现，表明属 I_b 型金刚石[12,16]。

原生金刚石成矿理论认为，金刚石通常在地幔深部形成，并由新元古代—新生代的岩浆活动携带至地表。通常产金刚石克拉通的地幔中都存在一个古老的含金刚石地幔楔[6-8,52-53]。辽宁瓦房店和山东蒙阴地区发现古生代的含金刚石金伯利岩，表明华北克拉通存在一个古老的含金刚石的地幔楔。在这种地幔楔中，I_b 型金刚石分布于浅部，I_a 型在中部，而Ⅱ型位于底部。金伯利岩因来源较深（150～250 km），通常捕获地幔中的 I_a 型金刚石以及少量 I_b 型金刚石[6-7, 54-55]；而基性岩来源较浅，虽存在捕获 I_b 型金刚石的可能性，但需进一步评估基性岩源区深度是否达到形成 I_b 型金刚石所需的温度和压力条件。一般而言，I_b 型金刚石的稳定区温度为 850～1 000 ℃，对应压力为 2.5～3.3 GPa，对应深度为 75～100 km[56-57]。苏北和栏杆地区辉绿岩的微量元素特征介于 OIB 和 E-MORB 之间，推测为地幔柱成因，此类辉绿岩的源区深度通常可达 70～140 km[58-59]，与 I_b 型金刚石的稳定深度相符。这表明苏北地区的辉绿岩在理论上符合金刚石载体条件，具有一定的找矿潜力。

尽管苏北地区的辉绿岩在岩石类型、地球化学特征和构造背景上与栏杆地区含金刚石母岩相似，但历时八年的苏北第二轮找矿，尚未取得重大突破。在辉绿岩中寻找原生金刚石矿床仍面临诸多挑战，尤其是大颗粒原生金刚石及其母岩（金伯利岩、钾镁煌斑岩）的形成与克拉通岩石圈地幔的深部特性密切相关。苏北和栏杆地区普遍发现的 I_b 型金刚石在自然界中较为罕见，其在地幔中存留时间相对较短，处于初生阶段即被带出金刚石稳定区而停止生长[16]，总体经济价值有限。

总结苏北地区原生金刚石找矿面临的问题及未来方向，笔者认为有必要聚焦于区域内金伯利岩和钾镁煌斑岩的寻找。近年来，江苏省地质局第五地质大队在徐州白露山新生代火山岩中选获 2 颗原生金刚石，与皖北—苏北地区辉绿岩中发现的 I_b 型金刚石不同，白露山出土的金刚石为 I_aA/I_aB 型，与辽宁瓦房店和山东蒙阴金伯利岩型的原生金刚石具有一定相似性[16, 48]。从构造位置看，白露山位于华北克拉通东南缘，靠近郯庐断裂带西侧，北部邻近山东蒙阴金伯利岩岩区，两者具有相似的地质背景，白露山岩体携带的金刚石可能来源于捕获的早期含金刚石金伯利岩[48]。此外，近期在苏北铜山地区西村和北村发现了金伯利岩管和金伯利岩脉，并在周边识别出橄榄金云母岩、煌斑岩及橄榄玄武玢岩等数十条暗色岩脉，共同构成一条 NE 向的金伯利岩-暗色岩条带，但其含矿性仍需进一步研究[50, 60-61]。综上所述，未来苏北地区原生金刚石找矿工作的重点应放在寻找含矿的金伯利岩或钾镁煌斑岩上，并结合地质背景，选择科学合适的找矿方法与工作部署。

5　结论

1）苏北和栏杆地区的辉绿岩中均发现 I_b 型原生金刚石，含金刚石与不含金刚石的辉绿岩在地球化学特征上无明显差异，均属拉斑系列的亚碱性玄武岩，形成于大陆板内环境。

2）部分含金刚石的辉绿岩可能存在地壳混染，但影响有限，并非主要成岩因素。这些辉绿岩为过渡型地幔源区组成，微量元素特征介于 OIB 和 E-MORB 之间，推测为地幔柱成因，源区深度通常为 60～140 km，与 I_b 型金刚石的稳定深度相符，具备作为金刚石载体的潜力。

3)此类金刚石在地幔中存留时间相对较短,总体经济价值有限。辉绿岩中寻找原生金刚石仍面临较大挑战。建议未来找矿重点转向金伯利岩或钾镁煌斑岩。

致谢:野外工作得到南京大学朱迎星和林亦含的帮助,在此一并感谢。

参考文献(References):

[1] 路凤香,郑建平,陈美华. 有关金刚石形成条件的讨论[J]. 地学前缘,1998,5(3):125-131.
Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Chen Meihua. Discussion on Formation Condition of Diamonds[J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(3): 125-131.

[2] 杨经绥,徐向珍,李源,等. 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,2012,27(11):3171-3178.
Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Li Yuan, et al. Diamonds Recovered from Peridotite of the Purang Ophiolite in the Yarlung-Zangbo Suture of Xizang: A Proposal for a New Type of Diamond Occurrence[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 27(11): 3171-3178.

[3] 杨经绥,徐向珍,白文吉,等. 蛇绿岩型金刚石的特征[J]. 岩石学报,2014,30(8):2113-2124.
Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Bai Wenji, et al. Features of Diamond in Ophiolite[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(8): 2113-2124.

[4] 杨献忠,袁学银,王军,等. 金刚石矿物学、包裹体及碳稳定同位素研究综述[J]. 中国地质调查,2019,6(6):12-18.
Yang Xianzhong, Yuan Xueyin, Wang Jun, et al. Review of Mineralogy, Inclusion and Carbon Stable Isotopic Studies of Diamond[J]. Geological Survey of China, 2019, 6(6): 12-18.

[5] Kirkley M B, Gurney J J, Levinson A A. Age, Origin, and Emplacement of Diamonds: Scientific Advances in the Last Decade[J]. Gem & Gemol, 1991, 27(1): 2-25.

[6] Gurney J J, Helmstaedt H H, Le Roex A P, et al. Diamonds: Crustal Distribution and Formation Processes in Time and Space and an Integrated Deposit Model[J]. Economic Geology, 2005, 100: 143-177.

[7] Gurney J J, Helmstaedt H H, Richardson S H, et al. Diamonds Through Time[J]. Economic Geology, 2010, 105(3): 689-712.

[8] Shirey S B, Cartigny P, Frost D J, et al. Diamonds and the Geology of Mantle Carbon[J]. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 2013, 75: 355-421.

[9] 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 Yitao, Chen Guoguang, Zhang Jie, et al. Geochemical Features of the Olivine-Gabbros and Their Relationship with Diamond-Mineralization in the Langan Area, Anhui Province[J]. Resources Survey and Environment, 2014, 35(4): 245-253.

[10] 蔡逸涛,张洁,董钟斗,等. 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,2018,45(2):351-366.
Cai Yitao, Zhang Jie, Dong Zhongdou, et al. 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, 2018, 45(2): 351-366.

[11] 张洁,蔡逸涛,董钟斗,等. 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,2015,17(5):1-11.
Zhang Jie, Cai Yitao, Dong Zhongdou, et al. Investigation on Mineral Characteristic of Diamond and Geochemical Characteristics of Its Host in Langan Area, Anhui Province[J]. Journal of Gems and Gemmology, 2015, 17(5): 1-11.

[12] 朱仁智,倪培,马玉广,等. 安徽栏杆地区辉绿岩型原生金刚石特征及成因初探[J]. 南京大学学报(自然科学),2018,54(2):279-295.
Zhu Renzhi, Ni Pei, Ma Yuguang, et al. Characteristics and Genetic Studies on Primary Diamonds from Mafic Rocks in Langan Area, Anhui Province[J]. Journal of Nanjing University (Nature Science), 2018, 54(2): 279-295.

[13] 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,2005,50:2514-2521.
Liu Yongqing, Gao Linzhi, Liu Yanxue, et al. The Early Neoproterozoic Mafic Magmatic Event in Xuhuai Area Zircon U-Pb Dating[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50: 2514-2521.

[14] 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,2011,41:796-815.
Wang Qinghai, Yang Debin, Xu Wenliang. Neoproterozoic Basic Magmatism in the Southeast

Margin of North China Craton: Evidence from Whole-Rock Geochemistry, U - Pb and Hf Isotopic Study of Zircons from Diabase Swarms in the Xuzhou-Huaibei Area [J]. Science China: Earth Science, 2011, 41: 796 - 815.

[15] Zhu R Z, Ni P, Wang G G, et al. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Laozhaishan Dolerite Sills in the Southeastern Margin of the North China Craton and Their Geological Implication[J]. Gondwana Research, 2019, 67: 131 - 146.

[16] 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 Yitao, Zhang Jie, Shi Jianbin, et al.A Discussion on the Origin of Basite Type Diamonds in the Southern Part of North China Craton: Evidences from FTIR[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(9): 2736 - 2747.

[17] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements [J]. Chemical Geology, 1977, 20: 325 - 343.

[18] Irvine T, Baragar W. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1971, 8: 523 - 548.

[19] Boynton W V. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies [J]. Developments in Geochemistry, 1984, 2: 63 - 114.

[20] Sun S S, McDonough W. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes [J]. Special Publications, London, Geological Society, 1989, 42 (1): 313 - 345.

[21] McDonough W F, McCulloch M T, Sun S S. Isotopic and Geochemical Systematics in Tertiary-Recent Basalts from Southeastern Australia and Implications for the Evolution of the Sub-Continental Lithosphere [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1985, 49: 2051 - 2067.

[22] Browning P. Igneous Petrogenesis a Global Tectonic Approach[J]. Geological Magazine, 1989, 126(4): 445.

[23] Weaver B L. The Origin of Ocean Island Basalt End Member Compositions: Trace Element and Isotopic Constraints[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 104:381 - 397.

[24] Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L. Tracking the Budget of Nb and Ta in the Continental Crust[J]. Chemical Geology, 2000, 165: 197 - 213.

[25] Condie K C. Sources of Proterozoic Mafic Dyke Swarms: Constraints from Th/Ta and La/Yb Ratios [J]. Precambrian Research, 1997, 81: 3 - 14.

[26] Le Roex A P, Dick H J B, Erlank A J, et al. 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, 1983, 24(3): 267 - 318.

[27] Pearce J A. A User's Guide to Basalt Discrimination Diagrams [J]. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 1996, 12: 79 - 113.

[28] Rudnick R L, Gao S. Composition of the Continental Crust[J]. Treatise on Geochemistry, 2003,3:1 - 64.

[29] Pearce J A. Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust[J]. Lithos, 2008, 100: 14 - 48.

[30] Halls H. The Importance and Potential of Mafic Dyke Swarms in Studies of Geodynamic Processes [J]. Geoscience Canada, 1982, 9(3): 145 - 154.

[31] 郑茜月,张宇,袁玲玲,等. 江南造山带通道地区两类辉绿岩成因及其构造背景探析[J]. 地质通报,2026, 45(2/3): 496 - 528.
Zheng Xiyue, Zhang Yu, Yuan Lingling, et al. Petrogenesis and Tectonic Setting of Two Types of Diabase in the Tongdao Area, Jiangnan Orogenic Belt [J]. Geological Bulletin of China, 2026, 45(2/3): 496 - 528.

[32] 黄思访,贺振,罗亚萍,等. 江南造山带的形成与演化:来自新元古代南桥辉绿岩的证据[J]. 华东地质, 2026,47(2):247 - 265.
Huang S F, He Z, Luo Y P, et al. Formation and Tectonic Evolution of the Jiangnan Orogen: Evidence from the Neoproterozoic Nanqiao Diabase[J]. East China Geology, 2026, 47(2): 247 - 265.

[33] Campbell I H. Identification of Ancient Mantle Plumes[J]. Special Paper of the Geological Society of America, 2001, 352: 5 - 21.

[34] Peng P, Bleeker W, Ernst R E, et al. U - Pb Baddeleyite Ages, Distribution and Geochemistry of 925 Ma Mafic Dykes and 900 Ma Sills in the North China Craton: Evidence for a Neoproterozoic Mantle Plume[J]. Lithos, 2011, 127: 210 - 221.

[35] Su X D, Peng P, Zhu R Z, et al. Multi-Stage

Evolution of the Xuhuai Rift: Insights from the Occurrence and Compositional Profiles of Doleritic Sills in the Southeastern Margin of the North China Craton[J]. Gondwana Research, 2020, 82: 221 - 240.

[36] 王博,张凯涵,丁俊英,等. 苏北地区牛蹄山新元古代辉绿岩锆石 U - Pb 年龄、地球化学特征及其对 Rodinia 超大陆裂解的响应[J/OL].地质通报,(2024 - 08 - 05). https://link. cnki. net/urlid/11. 4648. P. 20240805.1437.004.
Wang Bo, Zhang Kaihan, Ding Junying, et al. Zircon U - Pb Age and Geochemistry Characterization of the Niutishan Neoproterozoic Dolerite in the Northern Jiangsu Region and Their Response to the Fragmentation of the Rodinia Continent [J/OL]. Geological Bulletin of China, (2024 - 08 - 05). https://link. cnki. net/urlid/11. 4648. P. 20240805. 1437.004.

[37] Peng P, Zhai M G, Li Q L, et al. Neoproterozoic (~ 900 Ma) Sariwon Sills in North Korea: Geochronology, Geochemistry and Implications for the Evolution of the South-Eastern Margin of the North China Craton[J]. Gondwana Research, 2011, 20: 243 - 254.

[38] Zhang S H, Zhao Y, Ye H, et al. Early Neoproterozoic Emplacement of the Diabase Sill Swarms in the Liaodong Peninsula and Pre-Magmatic Uplift of the Southeastern North China Craton[J]. Precambrian Research, 2016, 272: 203 - 225.

[39] Pearce J A, Cann J. Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks Determined Using Trace Element Analyses[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 19: 290 - 300.

[40] Pearce T H, Gorman B E, Birkett T C. The TiO_2 - K_2O - P_2O_5 Diagram: A Method of Discriminating Between Oceanic and Non-Oceanic Basalts[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1975, 24: 419 - 426.

[41] 汪云亮,张成江,修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf - Ta/Hf 图解判别[J]. 岩石学报,2001, 17(3):412 - 421.
Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Xiu Shuzhi. Th/Hf - Ta/Hf Identification of Tectonic Setting of Basalts[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(3): 412 - 421.

[42] McCulloch M T, Gamble J A. Depleted Source for Volcanic Arc Basalts: Constraints from Basalts of Kemadec-Taupo Volcanic Zone Based on Trace Elements, Isotopes and Subduction Chemical Geodynamics [C]//Continental Magmatism. International Volcanic Conference Abstracts. New Mexico: Bureau of Mineral and Mineral Resources, 1989: 180.

[43] Taylor S R, McLeannan S. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985:209 - 372.

[44] Hofmann A W. Chemical Differentiation of the Earth: The Relationship Between Mantle, Continental Crust, and Oceanic Crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1988, 90: 297 - 314.

[45] Hofmann A W. Mantle Geochemistry: The Message from Oceanic Volcanism[J]. Nature, 1997, 385: 219 - 229.

[46] 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,1995,11:365 - 374.
Lu Fengxiang, Zhao Lei, Deng Jinfu, et al. The Discussion on the Ages of Kimberlitic Magma Activity in North China Platform [J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11: 365 - 374.

[47] 池际尚,路凤香,刘永顺,等. 中国原生金刚石成矿地质条件研究[M]. 北京:中国地质大学出版社,1996.
Chi Jishang, Lu Fengxiang, Liu Yongshun, et al. Study on Geological Conditions of Primary Diamond Mineralization in China [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1996.

[48] 向璐,郑建平. 中国原生金刚石形成条件及找矿思考[J]. 地质学报,2020,94(9):2574 - 2587.
Xiang Lu, Zheng Jianping. Formation Conditions of Primary Diamonds and Thoughts on Their Prospecting in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(9): 2574 - 2587.

[49] 倪培,朱仁智. 华北克拉通金伯利岩型金刚石矿床含矿性判别[J]. 地质学报,2020,94(9):2557 - 2573.
Ni Pei, Zhu Renzhi. Evaluating the Diamond Potential of Kimberlite-Hosted Diamond Deposits from the North China Craton [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(9): 2557 - 2573.

[50] 杨献忠,肖凡,劳金秀,等. 我国原生金刚石矿找矿勘查实践与研究新进展[J]. 华东地质,2024,45(2): 158 - 172.
Yang Xianzhong, Xiao Fan, Lao Jinxiu, et al. Process in the Exploration and Research of Primary Diamond Deposits in China[J]. East China Geology, 2024, 45(2): 158 - 172.

[51] 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 Qi, Zhou Qizhong, Wang Bo, et al. The Discussion of Primary Diamonds Exploration in Northern Jiangsu Province[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(5): 79-88.

[52] Haggerty S E. Diamond Genesis in a Multiply Constrained Model[J]. Nature, 1986, 320: 34-38.

[53] Wilson L, Head J W. An Integrated Model of Kimberlite Ascent and Eruption[J]. Nature, 2007, 447: 53-57.

[54] Le Roex A P, Bell D R, Davis P. Petrogenesis of Group I Kimberlites from Kimberley, South Africa: Evidence from Bulk Rock Geochemistry[J]. Journal of Petrology, 2003, 44(12): 2261-2286.

[55] Becker M, Le Roex A P. Geochemistry of South African on and off Craton, Group I and Group Ⅱ Kimberlites: Petrogenesis and Source Region Evolution[J]. Journal of Petrology, 2002, 47(4): 673-703.

[56] Evans T, Qi Z D.The Kinetics of the Aggregation of Nitrogen Atoms in Diamond[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical and Engineering Sciences, 1982, 381: 159-178.

[57] Chinn I, Kyser K, Viljoen F. Microdiamonds from the Thirsty Lake (Akluilak) Dykes, Northwest Territories, Canada [J]. Journal of Conference Abstracts, 2000, 5(2): 307-308.

[58] 徐义刚,钟孙霖. 二叠纪峨眉山大火成岩省的形成:地幔热柱活动的证据及其熔融条件[J]. 地球化学,2001,30(1):1-9.
Xu Yigang, Zhong Sunlin. The Emeishan Large Igneous Province:Evidence for Mantle Plume Activity and Melting Conditions[J]. Geochimica, 2001, 30(1): 1-9.

[59] 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]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所,2003.
He Shijie. Preliminary Study on Petrogenesis of Late Proterozoic Diabase Dike in Xuzhou Area [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2003.

[60] 周琦忠,张琪,宗德林,等. 徐州贾汪地区暗色岩锆石 U-Pb 年龄及金刚石成因探讨[J]. 华东地质,2018,39(3):202-211.
Zhou Qizhong, Zhang Qi, Zong Delin, et al. Zircon U-Pb Dating of Dark Rocks in the Jiawang Area, Xuzhou, and Diamond Genesis Analysis[J]. East China Geology, 2018, 39(3): 202-211.

[61] 施建斌,蔡逸涛,张琪,等. 徐州北部西村苦橄玢岩地球化学特征及其与金伯利岩的对比[J]. 地质学刊,2017,41(4):535-541.
Shi Jianbin, Cai Yitao, Zhang Qi, et al. Geochemical Characteristics of Picrite-Porphyrite and Its Comparison with Kimberlite in Xicun Village, Xuzhou City[J]. Journal of Geology, 2017, 41(4): 535-541.