



山东栖霞煌斑岩脉年代学、地球化学特征及其地质意义

靳立杰^{1,2}, 刘 晓³, 刘 伟¹, 王继林⁴, 徐 爽¹, 高继雷^{1,2},
李春稼¹, 王子圣¹, 武志敬⁵

1. 山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南 250100; 2. 山东省富铁矿勘查技术开发工程实验室, 山东 济南 250100; 3. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东 烟台 264004; 4. 中国冶金地质总局山东局测试中心, 山东 济南 250100; 5. 山东省地质矿产勘查开发局第五地质大队, 山东 泰安 271000

摘 要: 对山东栖霞河西乔地区的煌斑岩脉进行了岩相学、锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究。锆石 U-Pb 测年结果显示, 煌斑岩中锆石年龄可以分为 151~163 Ma、212~230 Ma、1 822~1 962 Ma 及 2 431~(2 613±37)Ma 四个年龄区间。其中 8 颗年轻锆石的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 (151±2)~(163±4)Ma 之间, 加权平均年龄为 153.7±2.8 Ma, 认为这一年龄代表了其形成时代。其余锆石均为继承锆石, 指示在岩浆活动过程中受到了壳源物质的混染。岩石地球化学的分析结果表明, 研究区煌斑岩具有 Rb、Ba、Th、Pb 及轻稀土元素富集, Ta、Nb、Zr、Hf、Ti 等元素相对亏损的特征。综合认为研究区煌斑岩形成于太平洋板块向欧亚板块俯冲背景下的火山弧环境, 在上升过程中受到了壳源物质的混染。

关键词: 煌斑岩; 锆石 U-Pb 年代学; 岩石地球化学; 岩石成因; 山东省

GEOCHRONOLOGY AND GEOCHEMISTRY OF THE LAMPROPHYRE DIKES IN QIXIA AREA, SHANDONG PROVINCE: Geological Implication

JIN Li-jie^{1,2}, LIU Xiao³, LIU wei¹, WANG Ji-lin⁴, XU Shuang¹, GAO Ji-lei^{1,2},
LI Chun-jia¹, WANG Zi-sheng¹, WU Zhi-jing⁵

1. No.1 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province, Ji'nan 250100, China;
2. Shandong Engineering Laboratory for High-Grade Fe Ores Exploration and Exploitation, Ji'nan 250100, China;
3. No. 3 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province, Yantai 264004, Shandong Province, China;
4. Shandong Branch Testing Center of China Metallurgical Geology Bureau, Ji'nan 250100, China;
5. No. 5 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province, Tai'an 271000, Shandong Province, China

Abstract: The paper studies the petrography, zircon U-Pb chronology and petrogeochemistry of the lamprophyre dikes in Hexikuang area of Qixia, Shandong Province. The zircon U-Pb dating results show that the age of zircons in the lamprophyre can be divided into four age intervals: 151-163 Ma, 212-230 Ma, 1 822-1 962 Ma and 2 431-(2 613±37) Ma. The ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages of eight young zircons range from (151±2) to (163±4) Ma, with the weighted mean age of 153.7±2.8 Ma, which represents its formation age. The others are inherited zircons, indicating that they are contaminated by crust-

收稿日期:2023-03-26;修回日期:2023-06-02. 编辑:张哲.

基金项目:山东省国土资源厅项目“山东省 1:5 万大汶口、楼德幅区域地质调查”(SDZS-2015-GTT01).

作者简介:靳立杰(1987—),男,硕士,高级工程师,主要从事区域地质调查与矿产勘查研究,通信地址 山东省济南市历城区唐冶新区敬德街 521 号地矿大厦, E-mail://jinlijie1987@163.com

通信作者:高继雷(1972—),男,研究员,主要从事固体矿产勘查工作、区域地质调查等,通信地址 山东省济南市历城区唐冶新区敬德街 521 号地矿大厦, E-mail://giljn@163.com

derived materials during magmatic activity. The lithogeochemical analysis results reveal that the lamprophyre in the area is characterized by enrichment of Rb, Ba, Th, Pb and LREEs, and relative depletion of Ta, Nb, Zr, Hf and Ti. From the above, it is concluded that the lamprophyre was formed in the volcanic arc environment under the background of subduction of Pacific Plate beneath Eurasian Plate, and was contaminated by crust-derived materials during its ascent.

Key words: lamprophyre; zircon U-Pb geochronology; lithogeochemistry; petrogenesis; Shandong Province

0 引言

胶东地区位于华北克拉通东南缘,是中国最大的黄金矿集区,一直以来受到国内外地质学家的广泛关注^[1-7]。前人的研究成果表明,胶东地区的岩浆活动主要集中在中新太古代、元古宙、中生代等,其中以中生代燕山期的岩浆活动与成矿作用最为发育^[2-3,5,8]。胶东地区的燕山期岩浆活动不仅形成了大量的花岗岩^[9],脉岩也极为发育。脉岩成岩时代贯穿侏罗纪和白垩纪,岩石类型包括煌斑岩、辉绿岩、闪长(玢)岩、石英闪长(玢)岩、花岗斑岩、伟晶岩等^[3,10]。查明胶东地区燕山期脉岩的形成时代、岩石成因和演化过程等对胶东地区的构造演化、成矿作用等具有重要的指示意义。

胶东地区的多个金矿床中分布着大量的煌斑岩,金矿与煌斑岩在形成时间、空间上具有明显的耦合关系^[11-16]。本文以栖霞市河西乔地区出露的煌斑岩脉作为主要研究对象,在野外工作的基础上,通过岩相学、岩石地球化学和锆石 U-Pb 年代学分析,总结煌斑岩的岩石学、地球化学特征,确定煌斑岩的形成时代,探讨其成因、形成环境、源区特征及构造意义,为胶东地区的构造演化提供约束。

1 区域地质概况

研究区位于华北板块东南缘,向西以郯庐断裂带为界与鲁西隆起、渤海湾盆地相邻,向东南以五莲-烟台断裂为界与苏鲁造山带相接。栖霞地区位于胶东地区中部(图 1),主要分布早前寒武纪变质基底、中生代盖层及中生代侵入岩^[18-19]。其中早前寒武纪变质基底主要由中新太古代 TTG 岩系、新太古代胶东群、古元古代粉子山群等组成;中生代岩浆岩主要为燕山期花岗岩,伴随着部分中基性岩脉。区内脆性断裂与韧性断裂均较为发育,其中脆性断裂以北东向断裂为主,贯穿全区,北西向断裂亦有分布;韧性断裂以北西向为主,北东向较少。受构造作用影响,岩石普遍发育片麻

状和条带状构造。

煌斑岩位于栖霞市河西乔,呈脉状产出,走向为北东向,与区域构造走向基本一致。煌斑岩脉宽度约 80 cm,产状近于直立。煌斑岩侵入太古宙石榴斜长角闪岩之中,侵入关系清楚,界面截然。煌斑岩新鲜面呈深灰色-黑绿色,煌斑结构,块状构造,主要由角闪石(60%~70%)、斜长石(30%~40%)组成,含有少量的石英、绿帘石、磷灰石、金属矿物等。其中角闪石晶形较完整,多以斑晶形式分布;斜长石为半自形-他形粒状,见有较细密的聚片双晶,晶型较差(图 2)。

2 分析方法

本研究的样品均采自新鲜岩脉,采样位置见图 1。本次共采集 2 件样品,对 2 件样品进行了岩石地球化学分析,1 件样品进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析。

2.1 岩石地球化学分析

岩石主量、微量元素地球化学分析在中国冶金地质总局山东局测试中心完成。其中,全岩主量分析元素采用 XRF 方法,分析仪器为 ARL 9900XP 型 X 射线荧光光谱仪;微量元素分析采用 ICP-MS 方法测定,分析仪器为 iCAP Q 电感耦合等离子体质谱仪与 XSeries2 电感耦合等离子体质谱仪。全岩主量元素的分析误差小于 2%,全岩微量元素的分析误差小于 5%。

2.2 锆石 LA-ICP-MS 年龄测定

锆石挑选工作由河北省诚信地质服务公司完成。在双目镜下挑选出无明显裂隙、干净透明的锆石颗粒将其制靶,并进行 CL 图像分析,选定最佳的待测锆石点位。锆石 LA-ICP-MS 的 U-Pb 同位素年代分析在中国冶金地质总局山东局测试中心完成,实验采用的激光剥蚀系统为美国 Conherent 公司生产的 GeoLasPro 193 nm ArF 准分子系统,ICP-MS 型号为 Thermo Fisher 公司生产的 iCAP Q。分析所用激光斑束直径为 24 μm ,

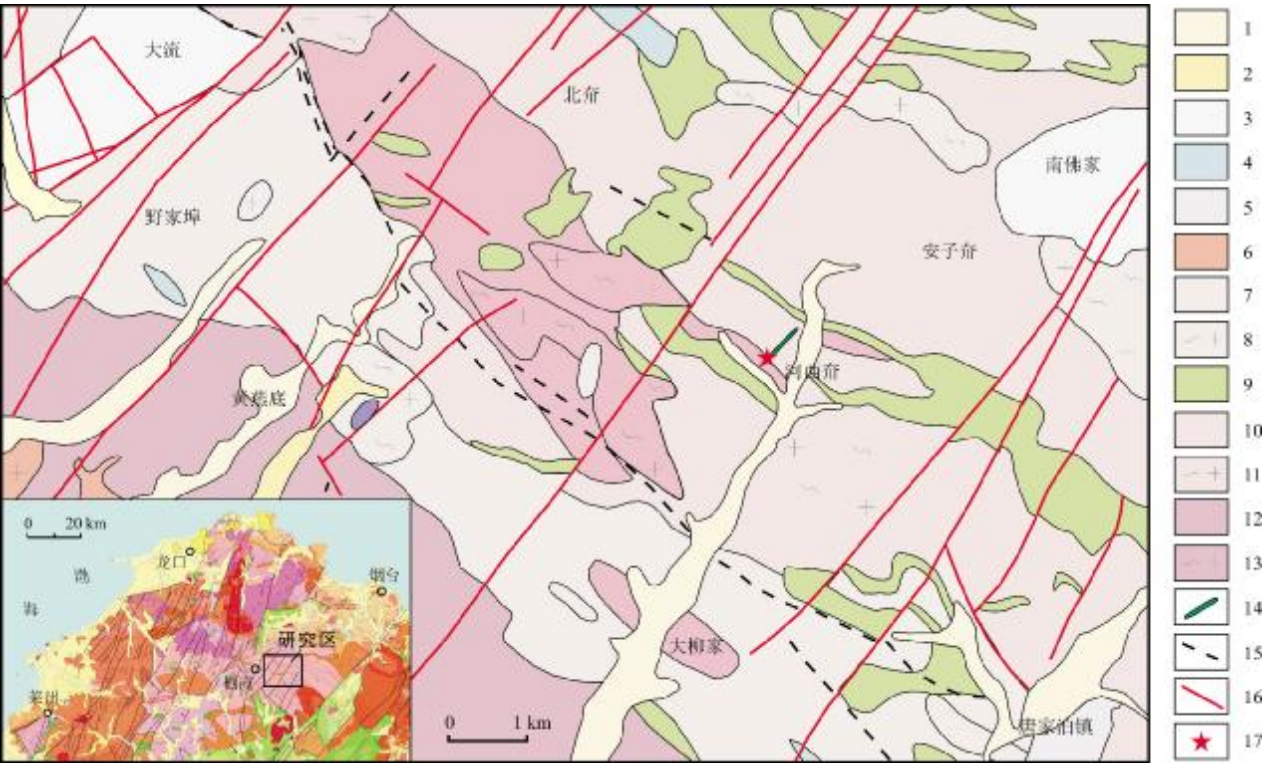


图 1 研究区地质图
(据文献[17]修改)

Fig. 1 Geological map of the study area
(Modified from Reference [17])

1—第四系(Quaternary); 2—中生界-新近系(Mesozoic-Neogene); 3—古元古代晚期粉子山群(late Paleoproterozoic Fenzishan gr.); 4—古元古代晚期胶东群(late Paleoproterozoic Jiaodong gr.); 5—中生代花岗岩(Mesozoic granite); 6—古元古代二长花岗岩(Paleoproterozoic monzogranite); 7—新太古代晚期英云闪长岩(late Neoproterozoic tonalite); 8—新太古代晚期奥长花岗岩(late Neoproterozoic trondhjemite); 9—新太古代晚期变辉长岩(late Neoproterozoic metagabbro); 10—新太古代早期英云闪长岩(early Neoproterozoic tonalite); 11—新太古代早期奥长花岗岩(early Neoproterozoic trondhjemite); 12—中太古代晚期英云闪长岩(late Mesoproterozoic tonalite); 13—中太古代晚期奥长花岗岩(late Mesoproterozoic trondhjemite); 14—煌斑岩脉(lamprophyre dike); 15—韧性剪切带(ductile shear zone); 16—断层(fault); 17—样品位置(sampling location)

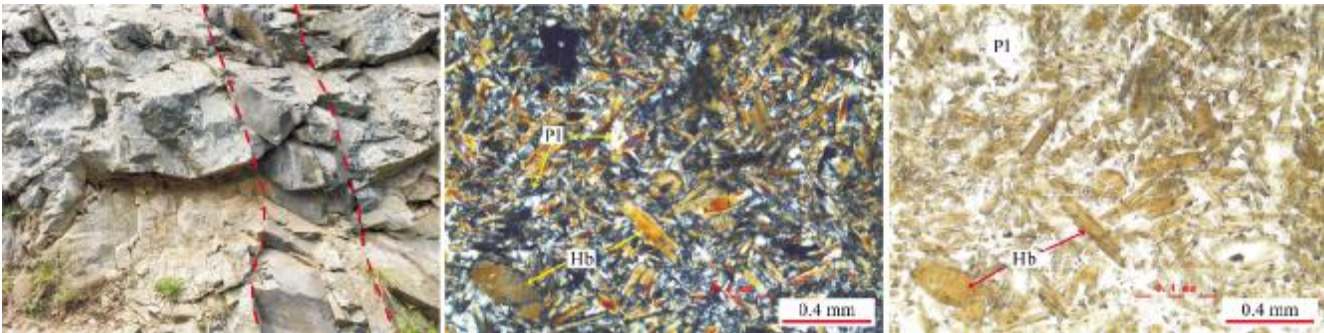


图 2 研究区煌斑岩野外照片及镜下特征

Fig. 2 Field and microscopic photographs of lamprophyre in the study area
Pl—斜长石(plagioclase); Hb—角闪石(hornblende)

采用国际标样 91500 为外标进行同位素分馏校正;采用 Plesovice 和 GJ-1 标准锆石作为外标进行基体校正;成分标样采用 NIST SRM 610, 其中 ^{29}Si 作为单内标元素进行校正, 每 5~10 个未知样品点插入一组标

样. 数据处理采用 ICPMS DataCal 软件^[20]完成, 普通 Pb 校正采用 ComPbCorr#3.17 完成^[21], 年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot3.0 完成^[22].

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年

样品中锆石主要呈短柱状, 少量为长柱状, 粒径在 70~250 μm 之间. 本次选取 31 颗锆石的 32 个测点进行分

析(图 3). 其中有 3 个测点谐和度低于 90%, 1 个测点的信号波动较大, 予以舍去, 其余 28 个测点的谐和度均大于 90%, 数据可靠. 分析结果(表 1, 扫描首页 OSID 二维码可见)显示: 锆石的 Th、U 含量分别为 $3\times 10^{-6}\sim 496\times 10^{-6}$ 、 $49\times 10^{-6}\sim 1533\times 10^{-6}$, Th/U 比值介于 0.01~1.84 之间.

由锆石 CL 图像特征、分析结果和 U-Pb 年龄谐和图(图 4)可以将锆石分为 2 种: 继承锆石和岩浆锆石. 本次仅对谐和度均大于 90% 的数据进行分析, 其中对于小于 1 000 Ma 的锆石采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄讨论, 大于 1 000 Ma 的锆石采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄进行讨论.

锆石年龄分布图显示, 主要存在 151~163 Ma、

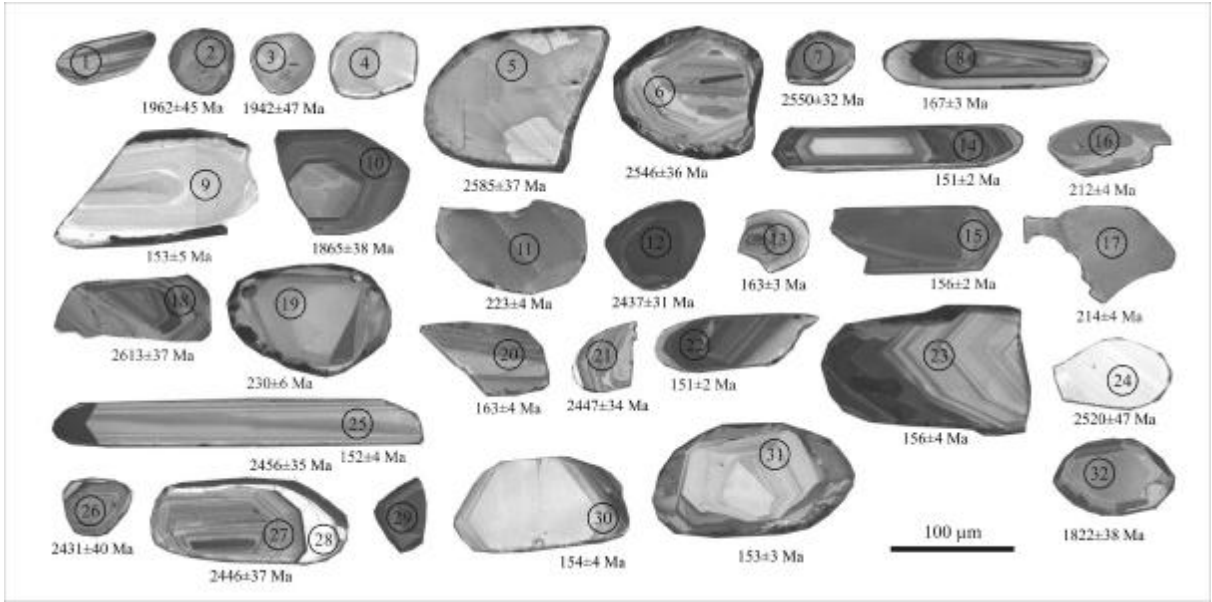


图 3 研究区煌斑岩锆石 CL 图像特征及年龄

Fig. 3 CL images and ages of selected zircons from lamprophyre in the study area

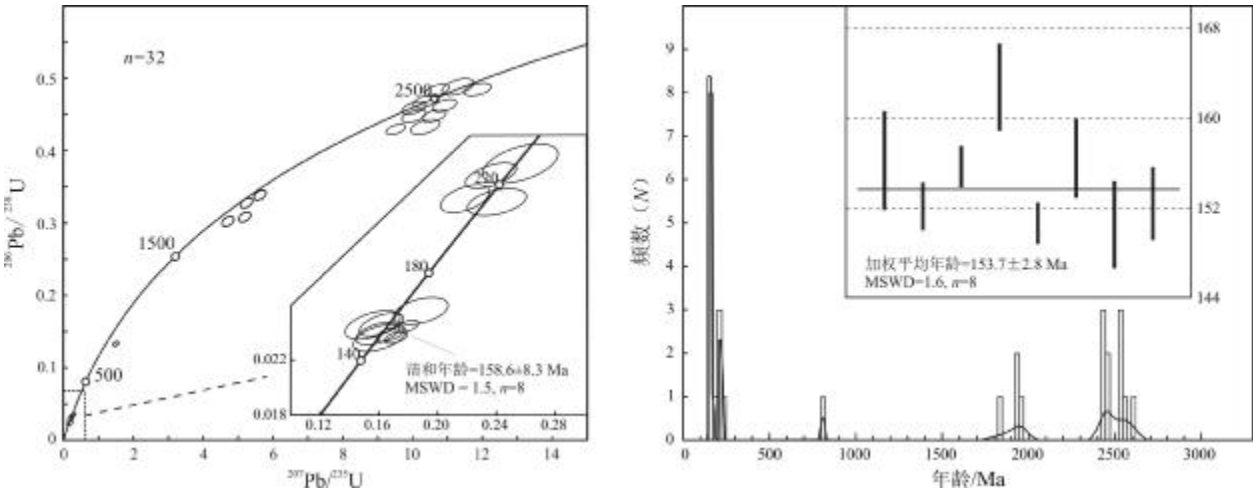


图 4 研究区煌斑岩锆石 U-Pb 年龄谐和图、年龄频率分布图和加权平均年龄图

Fig. 4 Zircon U-Pb age concordia, age frequency distribution and weighted mean age diagrams of lamprophyre in the study area

212~230 Ma、1 822~1 962 Ma 及 2 431~(2 613±37) Ma 四个年龄区间. 其中 151~163 Ma 锆石测点共 8 个,多呈柱状,Th/U=0.14~0.66,具有明显的振荡环带,为煌斑岩岩浆作用过程中形成的锆石. 经加权平均后得到的年龄为 153.7±2.8 Ma (MSWD=2.1,n=8). 我们认为这一年龄代表了煌斑岩的形成时间. 其余锆石均为继承锆石,其中 212~230 Ma 测点共 4 个, Th/U=0.76~1.57; 1 822~1 962 Ma 测点共 4 个, Th/U=0.01~0.02; 2 431~(2 613±37) Ma 测点共 10 个, Th/U=0.15~1.17.

3.2 岩石地球化学

主量元素分析结果(表 2,扫描首页 OSID 二维码可见)显示:栖霞河西乔地区煌斑岩的 SiO₂ 含量为 55.65%~55.80%,属于中性岩范畴; MgO 含量为 9.25%~9.62%; 全碱 Na₂O+K₂O 含量为 5.16%~5.23%, Na₂O/K₂O 比值为 1.59~1.59. 在 TAS 图解(图 5a)中样品落入钙碱性煌斑岩区域,而样品的摩尔比 K/(K+Na)=0.16~0.17, K/(K+Na)=0.27~0.29,根据路凤香等^[23]对煌斑岩 K/(K+Na)-K/Al 图解(图 5b)的分类原则,样品均落入钠质煌斑岩区域. 牟平-乳山^[14]及辽东^[24-25]地区的煌斑岩,主要为钠质煌斑岩,少量为钾质煌斑岩,与本次分析结果基本一致(图 5),因此认为研究区煌斑岩属于钠质钙碱性煌斑岩.

煌斑岩稀土元素含量(表 2,扫描首页 OSID 二维

码可见)变化不大,REE 总量在 141.06×10⁻⁶~141.59×10⁻⁶之间, LREE 的总量在 126.49×10⁻⁶~127.13×10⁻⁶之间, HREE 的总量在 14.46×10⁻⁶~14.57×10⁻⁶之间, LREE/HREE=8.68~8.79, La_N/Yb_N=11.05~11.28. 球粒陨石标准化稀土元素配分图(图 6)显示,样品具有相似的稀土配分模式,均表现为轻稀土富集、重稀土相对亏损的特点(图 6a),且稀土元素配分型式为轻稀土元素逐渐降低,重稀土元素则近于水平. δCe 为 1.04~1.06, δEu 为 0.78~0.79,具有负铕异常,表明岩体经历了一定的斜长石分离结晶作用或源区有一定量的斜长石残留. 就稀土元素总量而言,研究区煌斑岩总体上低于牟平-乳山煌斑岩,而与辽东地区煌斑岩较为相似.

在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6b)中,煌斑岩样品显示 Ta、Nb、Zr、Hf、Ti 等元素亏损,Rb、Ba、Th、Pb 等元素富集和轻稀土元素富集.

4 讨论

4.1 煌斑岩的形成时代

煌斑岩脉在胶东地区广泛发育,成岩时代主要为侏罗纪、白垩纪,与金矿的成矿关系紧密^[3]. 本次研究发现,煌斑岩年龄介于 151~163 Ma 区间的锆石具有晶型良好、振荡环带明显等特征,说明这些锆石是岩浆锆石,其年龄代表了岩浆作用的时间. 经加权平均后

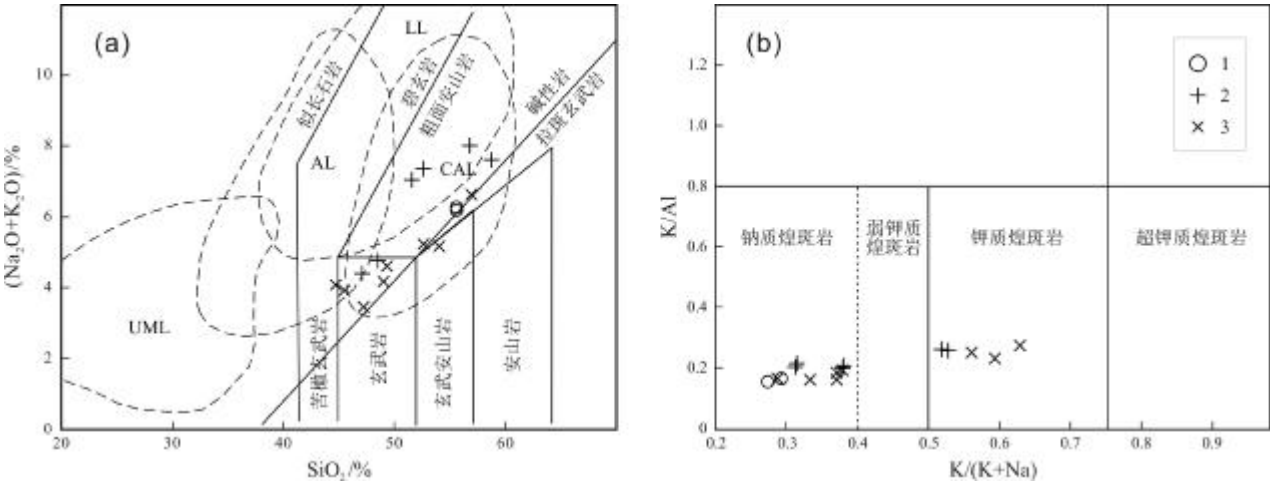


图 5 煌斑岩的 TAS 分类图和 K/Al-K/(K+Na)图
(据文献[23])

Fig. 5 The TAS diagram and K/Al-K/(K+Na) diagrams of lamprophyre
(After Reference [23])

1—栖霞样品(sample from Qixia area); 2—牟平-乳山样品(sample from Muping-Rushan area); 3—辽东样品(sample from eastern Liaoning); CAL—钙碱性煌斑岩(calc-alkaline lamprophyre); UML—超基性煌斑岩(ultrabasic lamprophyre); AL—碱性煌斑岩(alkaline lamprophyre); LL—钾镁煌斑岩(lamproite)

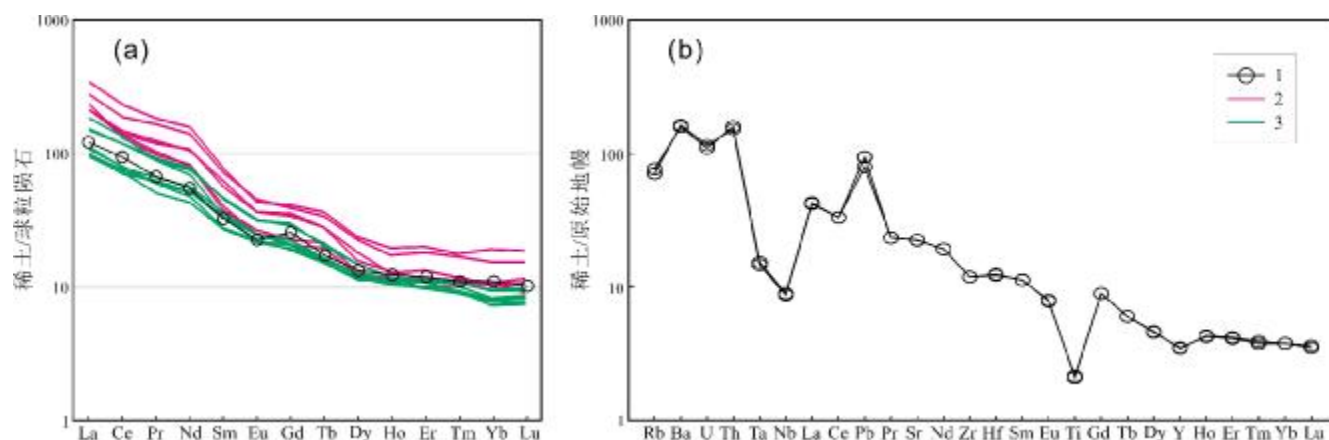


图6 煌斑岩球粒陨石标准化稀土元素配分图和原始地幔标准化微量元素蛛网图
(球粒陨石和原始地幔标准化数据引自文献[26])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spidergrams of lamprophyre
(Standardized data for chondrite and primitive mantle cited from Reference [26])

1—栖霞样品(sample from Qixia area); 2—牟平-乳山样品(sample from Muping-Rushan area); 3—辽东样品(sample from eastern Liaoning)

得到的年龄为 153.7 ± 2.8 Ma (MSWD=2.1, $n=8$), 笔者认为这一年龄代表了煌斑岩的形成时间, 即晚侏罗世。

4.2 煌斑岩岩浆源区及成因

煌斑岩在形成过程中不可避免地会受到一定程度的地壳混染。研究区煌斑岩锆石 U-Pb 定年结果显示, 存在部分 210~230 Ma、1 900~2 000 Ma 及 2 400~2 600 Ma 的继承锆石, 这是煌斑岩在岩浆活动过程中存在壳源物质混染的直接证据。

出露于胶东地区的粉子山群的碎屑锆石年龄在 2 033~3 429 Ma 之间, 且主要峰值为 2 190 Ma 和 2 480 Ma 左右^[48], 在 1 880~1 960 Ma 发生变质变形作用^[27]。此外, 在研究区存在 2 450~2 550 Ma 的 TTG 岩石, 本次研究的煌斑岩围岩石榴斜长角闪岩也在 2 500 Ma 遭受高压变质作用。这些地质体年龄可以与 1 900~2 000 Ma 及 2 400~2 600 Ma 的年龄进行对比。胶东地区中生代的岩浆活动可以分为 230~200 Ma、160~140 Ma 和 135~100 Ma 三个阶段, 其中在 230~200 Ma 阶段代表性的岩体为荣成槎山岩体、宁津所岩体等, 与本研究获得的 210~230 Ma 的年龄可以对比。

微量元素 Nb、Ta 具有相近的地球化学性质, 其比值在分离结晶和部分熔融等岩浆演化过程中一般变化很小, 可以用来探讨岩浆的物质源区特征^[28]。研究区煌斑岩的 Nb/Ta 比值为 10.11~10.35, 略高于下地壳的

Nb/Ta 比值(8.3)^[29], 与地壳混染岩石的 Nb/Ta 的比值十分接近(约为 11), 而远小于原始地幔的 Nb/Ta 比值(17.39)^[26]。另外, 张招崇等^[30]的研究表明, La/Sm 值会随着地壳混染程度的增大而显著增高, 一般在 5 以上。研究区煌斑岩的 La/Sm 为 5.77~5.86, 说明其受到了明显的壳源物质混染。

原始地幔标准化蛛网图(图 6b)显示, 煌斑岩样品与岛弧玄武岩相一致, 说明原始岩浆的形成与俯冲作用有关。此外, 研究区煌斑岩具有大离子亲石元素(如 Ba)及轻稀土元素富集, 高场强元素(如 Ta、Nb、Zr、Hf、Ti)相对亏损的特征。这些特征暗示了岩浆上升过程中遭受强烈的地壳物质混染, 或者洋壳物质因俯冲作用进入地幔所致。一般与俯冲作用相关的高场强元素具有典型的 Ta、Nb、Ti 相对亏损, 即“TNT”负异常的特征^[31]。而研究区内煌斑岩 Ta、Nb、Ti 与俯冲作用产生的“TNT”负异常特征完全吻合, 说明研究区煌斑岩的形成与板块的俯冲作用相关。

4.3 构造环境

采用 La/Nb-Ba/Nb 与 Hf/3-Th-Ta 构造环境判别图解(图 7)对研究区煌斑岩的形成环境进行了分析。La/Nb-Ba/Nb 图解(图 7a)显示, 研究区煌斑岩的形成环境为火山弧型, Ba/Nb 比值远远高于正常洋中脊和大陆地壳平均组分比值。Hf/3-Th-Ta 构造环境判别图解(图 7b)显示, 其形成环境为岛弧钙碱性玄武岩。辽

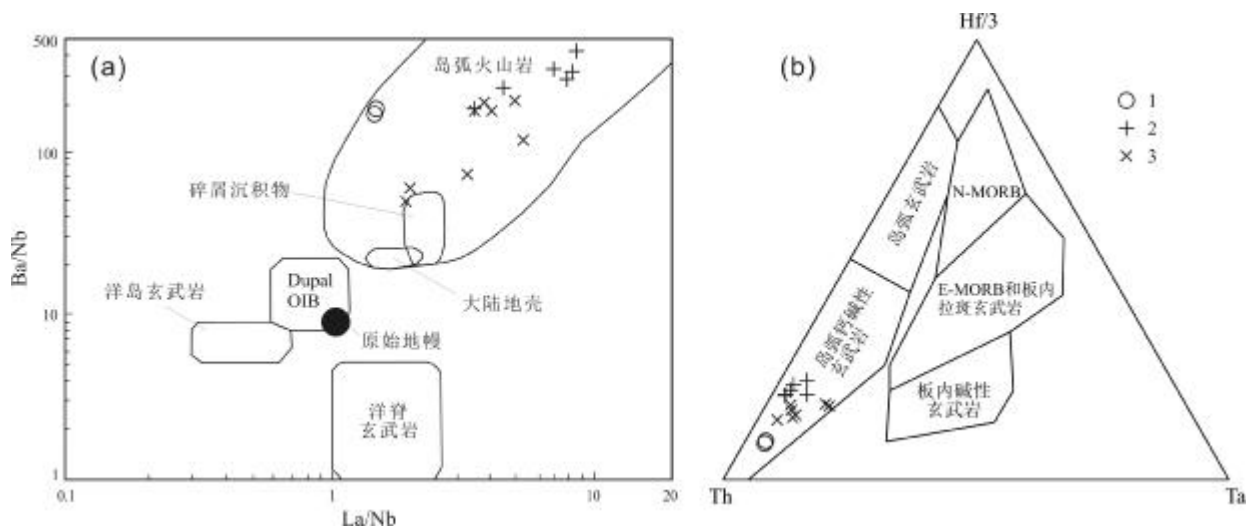


图7 研究区煌斑岩 La/Nb-Ba/Nb 与 Hf/3-Th-Ta 构造环境判别图解
(据文献[32-33])

Fig. 7 The La/Nb-Ba/Nb and Hf/3-Th-Ta tectonic environment discrimination diagrams of lamprophyre in the study area

(After References [32-33])

1—栖霞样品(sample from Qixia area); 2—牟平-乳山样品(sample from Muping-Rushan area); 3—辽东样品(sample from eastern Liaoning)

东半岛与牟平-乳山地区的煌斑岩在 La/Nb-Ba/Nb 与 Hf/3-Th-Ta 图解中也均落入岛弧火山岩与岛弧钙碱性火山岩区域,这说明三者的形成环境一致。

侏罗纪太平洋板块持续向欧亚板块俯冲,导致了 中国东部燕山造山带的形成,在华北板块发生大规模成岩作用^[3]。姜耀辉等^[24]通过对研究区北部的辽东半岛的煌斑岩群研究获得其时代为 155 ± 4 Ma,并认为其可能受到了来自俯冲板片流体的影响;祝德成等^[14]通过对牟平-乳山金成矿带的煌斑岩研究获得其时代为 150.6 ± 6.1 Ma,并认为原始岩浆的形成与俯冲作用相关。本研究所获得的煌斑岩年龄(153.7 ± 2.8 Ma)与北部的辽东半岛和东部的牟平-乳山煌斑岩时代一致。因此认为研究区煌斑岩是在太平洋板块向华北板块俯冲的火山弧环境形成。

5 结论

(1)研究区煌斑岩为闪斜煌斑岩,呈脉状产出,显示钠质煌斑岩特征。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示,研究区煌斑岩的形成年龄为 153.7 ± 2.8 Ma。

(2)研究区煌斑岩形成于太平洋板块向欧亚板块俯冲背景下的火山弧环境,在上升过程中受到了壳源物质的混染。

参考文献(References):

- [1]陈衍景, Pirajno F, 赖勇, 等. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境[J]. 岩石学报, 2004, 20(4): 907-922.
Chen Y J, Pirajno F, Lai Y, et al. Metallogenic time and tectonic setting of the Jiaodong gold province, eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(4): 907-922.
- [2]宋明春. 山东省大地构造单元组成、背景和演化[J]. 地质调查与研究, 2008, 31(3): 165-175.
Song M C. The composing, setting and evolution of tectonic units in Shandong Province[J]. Geological Survey and Research, 2008, 31(3): 165-175.
- [3]丁正江, 孙丰月, 刘福来, 等. 胶东伟德山地区铜钼多金属矿锆石 U-Pb 法测年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(2): 607-618.
Ding Z J, Sun F Y, Liu F L, et al. U-Pb dating of zircons from the Weideshan molybdenum copper polymetallic deposits in Jiaodong Peninsula, China, and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(2): 607-618.
- [4]朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等. 克拉通破坏型金矿床[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(8): 1153-1168.
Zhu R X, Fan H R, Li J W, et al. Decratonic gold deposits[J]. Science China Earth Sciences, 2015, 58(9): 1523-1537.
- [5]李洪奎, 卜文峰, 崔传源, 等. 山东胶东矿集区中生代构造事件与金矿成矿作用[J]. 山东国土资源, 2017, 33(1): 1-9, 34.
Li H K, Bu W F, Zhuo C Y, et al. Mesozoic tectonic events and mineralization of gold deposits in Jiaodong area in Shandong Province [J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33(1): 1-9, 34.

- [6]王瑞良, 张招崇, 曾庆栋, 等. 胶东栖霞金矿集区早白垩世花岗岩形成时代及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(1): 186–198.
- Wang R L, Zhang Z Z, Zeng Q D, et al. Ages of the Early Cretaceous granites in Qixia gold concentration area, Shandong Province and implications for gold mineralization[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2019, 43(1): 186–198.
- [7]迟乃杰, 韩作振, 单伟, 等. 胶东郭家岭序列北截杂岩体 SHRIMP 锆石 U–Pb 年代学、岩石学、地球化学特征及构造意义[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 30–42.
- Chi N J, Han Z Z, Shan W, et al. SHRIMP U–Pb zircon geochronology, petrology, geochemical characteristics and tectonic significance of Beijie complex of Guojialing sequence in Jiaodong Peninsula[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 40(5): 30–42.
- [8]宋明春, 崔书学, 周明岭, 等. 山东省焦家矿区深部超大型金矿床及其对“焦家式”金矿的启示[J]. 地质学报, 2010, 84(9): 1349–1358.
- Song M C, Cui S X, Zhou M L, et al. The deep oversize gold deposit in the Jiaojia field, Shandong Province and its enlightenment for the Jiaojia-type gold deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(9): 1349–1358.
- [9]李洪奎, 陈国栋, 耿科, 等. 山东胶东金矿成矿地质背景初论[J]. 山东国土资源, 2018, 34(5): 34–41.
- Li H K, Chen G D, Geng K, et al. Primary discussion on mineralization geological background of Jiaodong gold deposits in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(5): 34–41.
- [10]李秀章, 王立功, 李衣鑫, 等. 胶东艾山岩体二长花岗岩地球化学、锆石 U–Pb 年代学及 Lu–Hf 同位素特征研究[J]. 现代地质, 2022, 36(1): 333–346.
- Li X Z, Wang L G, Li Y X, et al. Geochemistry, zircon U–Pb chronology and Lu–Hf isotope characteristics of monzogranites from Aishan pluton in Jiaodong Peninsula[J]. Geoscience, 2022, 36(1): 333–346.
- [11]程小久, 程景平, 王江海, 等. 胶东蓬家乔金矿区钾玄质煌斑岩的元素地球化学研究[J]. 地球化学, 1998, 27(1): 91–100.
- Cheng X J, Cheng J P, Wang J H, et al. Element geochemistry of shoshonitic lamprophyres in the Pengjiakuang gold district, Shandong Province, China[J]. Geochimica, 1998, 27(1): 91–100.
- [12]徐红, 徐光平. 胶东煌斑岩的地球化学特征及成因探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 2000, 19(1): 36–44.
- Xu H, Xu G P. Geochemical characteristics and genesis of the lamprophyres in the Jiaodong gold ore district, Shandong Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2000, 19(1): 36–44.
- [13]耿瑞, 孙丰月, 丁正江, 等. 山东栖霞地区与金矿有关的煌斑岩地球化学特征及成因探讨[J]. 地质与资源, 2012, 21(2): 229–233.
- Geng R, Sun F Y, Ding Z J, et al. Geochemistry and petrogenesis of the lamprophyres related to gold deposits in Qixia, Shandong Province[J]. Geology and Resources, 2012, 21(2): 229–233.
- [14]祝德成, 韩振玉, 田瑞聪, 等. 山东牟平–乳山金成矿带南段煌斑岩成因机制研究[J]. 地球学报, 2019, 40(2): 249–258.
- Zhu D C, Han Z Y, Tian R C, et al. Formation mechanism of lamprophyres in southeast part of the Muping-Rushan gold metallogenic belt in Shandong Province[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2019, 40(2): 249–258.
- [15]Rock N M S, Groves D I. Do lamprophyres carry gold as well as diamonds? [J]. Nature, 1988, 332(6161): 253–255.
- [16]Preleviċ D, Foley S F, Cvetkoviċ V, et al. Origin of minette by mixing of lamproite and dacite magmas in Veliki Majdan, Serbia[J]. Journal of Petrology, 2004, 45(4): 759–792.
- [17]万渝生, 宋志勇, 王来明, 等. 华北克拉通太古宙典型地区栖霞县幅 1:5 万地质图修编——野外地质调查和 SHRIMP 锆石 U–Pb 定年[J]. 地质通报, 2017, 36(11): 1927–1941.
- Wan Y S, Song Z Y, Wang L M, et al. Early Precambrian evolution of the Qixia area, eastern North China Craton: Evidence from geological mapping and SHRIMP U–Pb zircon dating[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(11): 1927–1941.
- [18]谢士稳, 王世进, 颜炳强, 等. 华北克拉通胶东地区粉子山群碎屑锆石 SHRIMP U–Pb 定年[J]. 岩石学报, 2014, 30(10): 2989–2998.
- Xie S W, Wang S J, Xie H Q, et al. SHRIMP U–Pb dating of detrital zircons from the Fenzishan Group in eastern Shandong, North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(10): 2989–2998.
- [19]宋英昕, 宋明春, 李世勇, 等. 胶东晚中生代三期成矿岩体和 3.5 Ga 锆石发现及成矿动力学背景[J]. 地质学报, 2019, 93(2): 440–458.
- Song Y X, Song M C, Li S Y, et al. The discovery of three-stage Late Mesozoic metallogenic granitic bodies and 3.5 Ga zircon in the Jiaodong terrane and their metallogenetic geodynamical setting[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(2): 440–458.
- [20]Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U–Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537–571.
- [21]Andersen T. Correction of common lead in U–Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59–79.
- [22]Ludwig K R. ISOPLLOT 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003.
- [23]路凤香, 舒小辛, 赵崇贺. 有关煌斑岩分类的建议[J]. 地质科技情报, 1991, 10(S1): 55–62.
- Lu F X, Shu X X, Zhao C H. A suggestion on classification of lamprophyres [J]. Geological Science and Technology Information, 1991, 10(S1): 55–62.

- [24]姜耀辉, 蒋少涌, 赵葵东, 等. 辽东半岛煌斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对中国东部岩石圈减薄开始时间的制约[J]. 科学通报, 2005, 50(19): 2161-2168.
- Jiang Y H, Jiang S Y, Zhao K D, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating for lamprophyre from Liaodong Peninsula: Constraints on the initial time of Mesozoic lithosphere thinning beneath eastern China [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(22): 2612-2620.
- [25]贾宏翔, 陈仁义, 庞振山, 等. 辽东青城子矿集区白云金矿床煌斑岩的岩石成因: 年代学、地球化学与 Pb、Hf 同位素约束[J]. 中国地质, 2022, 49(5): 1605-1623.
- Jia H X, Chen R Y, Pang Z S, et al. Lamprophyre origin of the Baiyun gold deposit in Qingchengzi ore concentration area, eastern Liaoning Province: Constraints of geochronology, geochemistry and Pb, Hf isotopes[J]. Geology in China, 2022, 49(5): 1605-1623.
- [26]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42 (1): 313-345.
- [27]Li S Z, Zhao G C, Santosh M, et al. Paleoproterozoic structural evolution of the southern segment of the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton[J]. Precambrian Research, 2012, 200-203: 59-73.
- [28]Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. Chemical Geology, 1995, 120(3/4): 347-359.
- [29]Plank T. Constraints from thorium/lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents[J]. Journal of Petrology, 2005, 46(5): 921-944.
- [30]张招崇, 王福生, 郝艳丽, 等. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束[J]. 地质学报, 2004, 78(2): 171-180.
- Zhang Z C, Wang F S, Hao Y L, et al. Geochemistry of the picrites and associated basalts from the Emeishan large igneous basalt province and constraints on their source region[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(2): 171-180.
- [31]曹华文, 张寿庭, 王长明, 等. 云南个旧煌斑岩脉地球化学特征及其地质意义[J]. 地球化学, 2013, 42(4): 340-351.
- Cao H W, Zhang S T, Wang C M, et al. Geochemical characteristics and genesis of lamprophyres in Gejiu tin deposit, Yunnan Province, China[J]. Geochimica, 2013, 42(4): 340-351.
- [32]刘燊, 胡瑞忠, 赵军红, 等. 胶北晚中生代煌斑岩的岩石地球化学特征及其成因研究[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 947-958.
- Liu S, Hu R Z, Zhao J H, et al. Geochemical characteristics and petrogenetic investigation of the Late Mesozoic lamprophyres of Jiaobei, Shandong Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21 (3): 947-958.
- [33]Wood D A, Joron J L, Treuil M. A re-appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1979, 45(2): 326-336.
-
- (上接第 142 页/Continued from Page 142)
- [31]朱日祥, 徐义刚. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(9): 1346-1356.
- Zhu R X, Xu Y G. The subduction of the west Pacific plate and the destruction of the North China Craton [J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(9): 1340-1350.
- [32]唐克东, 鞠楠, 张大权, 等. 关于古亚洲洋构造演化研究的几点思考[J]. 地质与资源, 2022, 31(3): 246-258, 330.
- Tang K D, Ju N, Zhang D Q, et al. Implication of the tectonic evolution of Paleo-Asian Ocean[J]. Geology and Resources, 2022, 31 (3): 246-258, 330.
- [33]张允平, 宋维民, 那福超, 等. 蒙古-鄂霍茨克褶皱系地质特征及其构造属性讨论[J]. 地质与资源, 2022, 31(3): 259-274, 288.
- Zhang Y P, Song W M, Na F C, et al. Geological characteristics and tectonic attribute of Mongolia-Okhotsk fold system[J]. Geology and Resources, 2022, 31(3): 259-274, 288.
- [34]Sun D Y, Gou J, Wang T H, et al. Geochronological and geochemical constraints on the Erguna massif basement, NE China: Subduction history of the Mongol-Okhotsk oceanic crust[J]. International Geology Review, 2013, 55(14): 1801-1816.
- [35]李宇, 丁磊磊, 许文良, 等. 孙吴地区中侏罗世白云母花岗岩的年代学与地球化学: 对蒙古-鄂霍茨克洋闭合时间的限定[J]. 岩石学报, 2015, 31(1): 56-66.
- Li Y, Ding L L, Xu W L, et al. Geochronology and geochemistry of muscovite granite in Sunwu area, NE China: Implications for the timing of closure of the Mongol-Okhotsk Ocean[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(1): 56-66.
- [36]Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. J Petrol, 1984, 25: 956-983.