

山东省四期A型花岗岩类及其对大地构造演化的启示

王斌^{1,2}, 宋明春^{1*}, 周建波², 丁正江¹, 鲍中义¹, 吕军阳¹, 王珊珊¹

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东 威海 264209; 2. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061)

摘要:多阶段地质构造过程和多重地球动力学背景, 导致了山东省大地构造演化的复杂历程。自中太古代以来山东地区岩浆活动强烈, 花岗岩类分布广泛、演化序列清楚、形成时代多样, 为大地构造演化研究提供了重要的地质基础。本文研究了山东省新太古代、新元古代、三叠纪、白垩纪四个重要构造岩浆活动阶段末期花岗岩类的岩石组合、地质特征、地球化学特点、成因、物质来源和构造环境等, 这些花岗岩均具A型花岗岩特征, 发生于各地壳运动阶段末期, 是指示山东地区和华北克拉通地壳演化及构造阶段转折的关键标志。其中, 鲁西临沂四海山花岗岩类为A₂型花岗岩, 属太古宙微陆块陆-陆或弧-陆碰撞的后造山拉张环境花岗岩类; 日照岚山头花岗质片麻岩早期为A₂型花岗岩, 晚期为A₁型花岗岩, 是与Rodinia超大陆裂解事件有关的新元古代非造山拉张环境花岗质片麻岩; 威海石岛花岗岩类为A₂型花岗岩, 是三叠纪扬子板块与华北板块陆-陆碰撞的后造山拉张环境花岗岩类; 青岛崂山花岗岩类和日照大店石英正长岩类由早期A₂型和晚期A₁型花岗岩组成, 为非造山拉张环境的花岗岩类, 是早白垩世克拉通破坏峰期后的重要标志。

关键词:山东省; A型花岗岩类; 构造演化; 拉张环境

中图分类号: P588.121

文献标识码: A

文章编号: 2097-0188(2022)02-0001-18

A型花岗岩的分类、岩浆起源和演化、形成的特殊构造背景和重要的地球动力学意义, 是当前地学研究中的一个前沿课题, 已引起众多学者的关注^[1-6]。A型花岗岩是Loiselle等首先根据碱性(alkaline)、贫水(anhydrous)和非造山(anorogenic)三个英文单词首“*A*”提出^[7]。该类型花岗岩以高Si、富K, 贫Ca、Mg和Al, 富集HFSE, 强烈亏损Ba、Sr、P、Ti为特征, REE配分曲线呈具显著Eu负异常的分布模式^[6]。一般认为A型花岗岩可以划分为两种不同类型, A₁类型被认为源自地幔, 为非造山型, 通常侵位于板内裂谷环境或形成于板内岩浆作用; A₂类型为后造山型, 通常侵位于陆-陆碰撞的后造山环境, 可能源于大陆地壳或底板地壳的熔融^[8-11]。A型花岗岩形成于地壳伸展减薄构造背景下的拉张环境, 与碰撞后造山过程密切相关^[5,7,12-14]。地壳拉张背景的性质及程度是制约A型花岗岩形成并影响其岩浆性质、侵位方式等特征的重要因素之一。因此, A型花岗岩的确定已成为判别陆壳伸展拉张构造环境、造山作用结束时间及地点的重要岩石学标志^[9,15-20]。

山东省地质构造复杂、演化历史漫长, 出现了一些在中国大陆上具有代表意义的地质现象: 既有太古宙的稳定古老陆块, 又有现代仍在活动的断裂构造带; 既有古元古代活动带, 又有大范围出露的超高压变质带; 既有华北克拉通稳定的古生代陆表海沉积, 又有与克拉通破坏有关的中生代盆岭构造、大规模岩浆活动、大规模成矿作用等。这些地质现象不仅记录了微陆块型古板块演化旋回的完整历史, 也叠加了古特提斯构造域的扬子板块与华北板块的挤压拼接和滨太平洋构造域的太平洋板块向欧亚板块俯冲两种动力学背景^[21-22]。由于复杂的地质构造过程和多重地球动力学背景, 导致了山东省大地构造演化的复杂历程, 使得研究者对山东省大地构造演化阶段的认识存在分歧。

山东地区自中太古代以来岩浆活动强烈, 花岗岩分布广泛、演化序列清楚、形成时代多期, 是研究山东省和华北克拉通地壳演化的经典地区。在鲁西地块中部、胶北地块和苏鲁造山带南部及东部出现不同岩浆旋回晚期的A型花岗岩类, 分别为临沂四

收稿日期: 2022-04-02

资助项目: 国家自然科学基金项目“胶东深部金矿断裂控矿机理”(U2006201)

作者简介: 王斌(1990-), 男, 博士, 工程师, 主要从事矿产勘查、区域地质调查及构造地质学研究工作, E-mail: wangbinjlu@163.com; *通讯作者: 宋明春(1963-), 男, 博士, 研究员, 主要从事矿产勘查、区域地质调查及相关研究, E-mail: mingchuns@163.com。

海山花岗岩类(新太古代)、日照岚山头花岗质片麻岩(新元古代)、威海石岛花岗岩类(晚三叠世)、青岛崂山花岗岩类及日照大店石英正长岩类(白垩纪),对于研究山东省和华北克拉通地壳演化具有重要意义。另外,形成于古元古代末(1.86 Ga)的胶北回里淡色花岗岩被认为具有A型花岗岩特征^[23],鉴于胶北地块的古元古代花岗岩类岩浆活动不甚发育,本文未对其进行研究。本文以山东省主要的四期A型花岗岩类为研究对象,进行岩石学、锆石U-Pb年龄及地球化学特征研究,探讨其成岩时代、岩石类型、成因与构造环境,对山东主要大地构造演化阶段进行了限定,对构造演化过程进行了讨论。

1 区域地质背景

山东地区位于中国大陆地壳中的华北板块的东南缘和中央造山带的东端(图1a),由不同时代、不同性质、不同构造层次的地质块体互相拼贴组合而成。山东省各断代地层发育比较齐全,自中太古代至新生代地层都有分布,地表出露以中、新生代和古生代地层为主,元古宙地层分布局限,太古宙地层零星出露。

沂沭断裂带(郯庐断裂带的山东段)纵贯山东中部,将山东一分为二。苏鲁造山带奠定了鲁东地区基底构造线的总体格局,齐河-广饶断裂和聊城-兰考断裂则是分划鲁西地块和华北拗陷平原的构造带。因此,山东地质块体所反映的地表构造格局具有一坳(济阳拗陷)、两块(鲁西地块、胶北地块)、两带(沂沭断裂带、苏鲁造山带)及一域(黄、渤海陆架海域)六大构造块体格局,总体显示为以沂沭断裂带为主干,两侧构造线向沂沭断裂带逐渐收敛,大致以沂沭断裂带南部为收敛端,两侧向NW及NE方向辐射的“羽状”或“扇形”构造格局。

山东省岩浆活动颇为活跃,从太古宙至新生代都有发现(图1b)。除新太古代、古元古代、中生代及新生代有火山活动外,其他地质年代均以岩浆侵入活动为主。新太古代岩浆活动在山东境内普遍强烈发育,新元古代在鲁东南地区最强烈,中生代在鲁东地区最强烈。岩浆岩出露面积约30 976 km²,约占全省陆地面积的20%,以中生代岩浆岩出露面积最大,其次为新太古代及新元古代岩浆岩,古生代及中元古代岩浆岩分布最少。按照岩浆岩的时空分布特点,结合构造分区,将山东岩浆岩划分为鲁西构

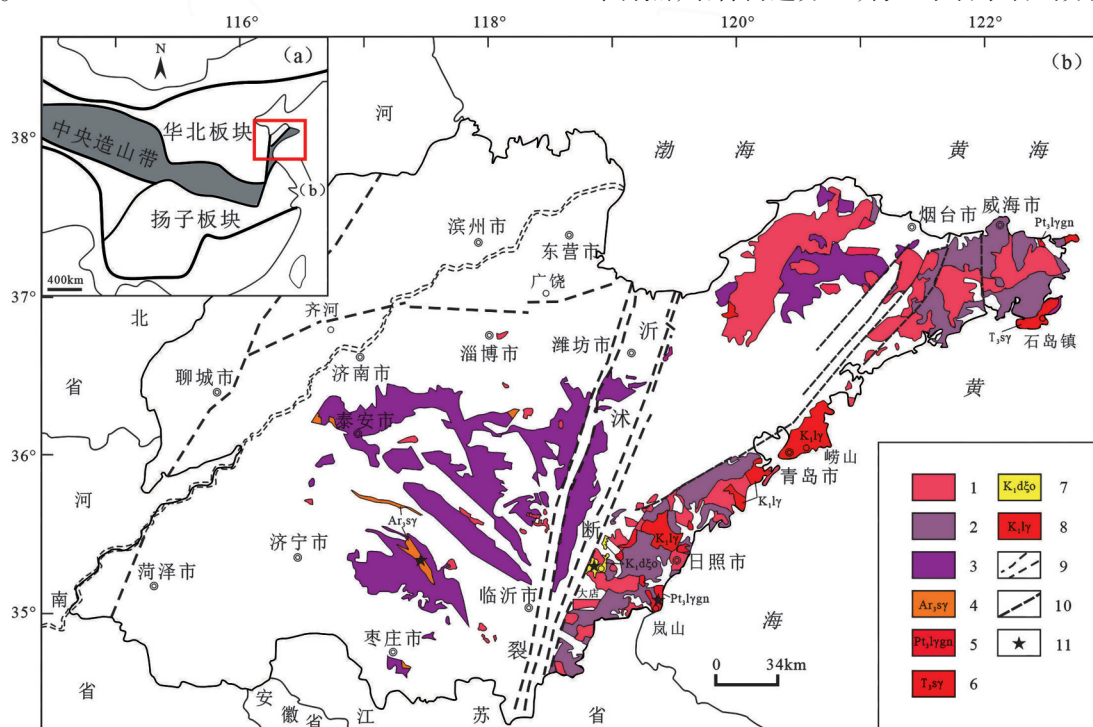


图1 山东省侵入岩分布略图(据参考文献[22])

Fig.1 Simplified distribution geological map of intrusive rocks in Shandong province

1. 中生代侵入岩;2. 元古宙侵入岩;3. 太古宙侵入岩;4. 新太古代四海山花岗岩类(Ar₃sy);5. 新元古代岚山头花岗质片麻岩(Pt₁lygn);6. 晚三叠世石岛花岗岩类(T₃sy);7. 早白垩世大店石英正长岩类(K₁dξo);8. 早白垩世崂山花岗岩类(K₁ly);9. 实测/推测断裂构造;10. 深大断裂;11. 采样点位置

造岩浆区及鲁东构造岩浆区,二者以沂沭断裂为界^[21](图1)。鲁西的新太古代花岗岩类、鲁东南的新元古代花岗岩类和鲁东的燕山期花岗岩类均表现为从早期的钠质花岗岩向钙碱性花岗岩及晚期的偏碱性花岗岩转变的演化趋势。岩浆岩在空间上具有区域成带分布特点,在时间上则显示出多旋回活动的特点,在形成上具有多成因的特点。因此,岩浆岩在时空分布上的“区域成带性”、“多旋回性”和“多成因性”是山东省岩浆岩分布的基本轮廓。岩浆岩的时空分布及其形成、演化和构造运动的发生、发展息息相关。

2 四期A型花岗岩地质特征及岩石特征

本次研究采集鲁西临沂四海山花岗岩类、苏鲁造山带日照岚山头花岗质片麻岩和日照大店石英正长岩类进行分析测试,采样位置见图1b。同时收集晚三叠世石岛花岗岩类、早白垩世崂山花岗岩类数据资料进行综合研究。

2.1 临沂四海山花岗岩类

四海山花岗岩类由四海山正长花岗岩和摩天岭二长花岗岩组成。四海山正长花岗岩主要分布于傲徕山岩浆活动带的南、北两侧,侵入于新太古代傲徕山花岗岩类中,出露面积约占鲁西早前寒武纪侵入岩面积的2.6%,主要岩石类型为正长花岗岩,个别为石英正长岩。岩石主要由钾长石(51%~64%)、石英(22%~33%)、斜长石(5%~25%)组成,少量黑云母(1%~5%);分布于鲁山、沂山等地的四海山花岗岩,其矿物含量与四海山地区的略有不同,含少量角闪石。自早期侵入体至晚期侵入体,岩石结构由中粗粒-细粒结构,矿物粒度由粗变细;物质成分上总体表现为暗色矿物逐渐减少,浅色矿物逐渐增多的趋势^[22,24]。摩天岭二长花岗岩零星分布于傲徕山岩浆活动带中部的宁阳-沂南一带,侵入于傲徕山花岗岩类和红门花岗闪长岩类中,出露面积约占鲁西早前寒武纪侵入岩面积的1.2%。岩石主要由斜长石(22%~44%)、钾长石(16%~27%)、石英(25%~51%)组成,少量暗色矿物(黑云母、角闪石、绿帘石,总含量约2%~12%)。自早期侵入体至晚期侵入体,岩石结构由中细粒到细粒,矿物成分上有向富钾长石方向演化的趋势^[22-23]。四海山花岗岩类为新太古代末期岩浆活动的产物。

2.2 日照岚山头花岗质片麻岩

山东省的区调工作者将其划归铁山片麻岩套,主要见于日照岚山头、诸城磊石山、胶南铁山、文登泽头和威海崮山等地,由两种类型花岗片麻岩组成,早期为正长花岗质片麻岩,晚期为碱性含霓石花岗质片麻岩,以后者为主,约占片麻岩套总面积的63%。岩石普遍经受了强烈的韧性剪切变形作用,具糜棱结构、粒状变晶结构、变余花岗岩结构,条痕状、片麻状及似层状构造,主要矿物粒径0.2~4 mm。对片麻岩样品进行定量矿物统计,投点于正长花岗岩区和碱长花岗岩区^[25]。投点于正长花岗岩区的岩石矿物成分为:石英24.25~38.24%,钠长石($An < 5$)15.20~20.59%,钾长石45.64~53.71%,黑云母+多硅白云母0.89~4.00%;投点于碱长花岗岩区的岩石矿物成分为:石英22.50~27.60%,钠长石($An < 5$)13.50~42.91%,钾长石25.15~50.00%,黑云母+多硅白云母0~1.06%,霓石+霓辉石1.00~10.00%,钠闪石0~0.34%。该片麻岩类以碱性长石含量高,常含霓石、钠闪石等碱性矿物以及常含榴辉岩包体等特征区别于苏鲁造山带新元古代荣成和月季山花岗质片麻岩套。单锆石Pb-Pb同位素年龄是 622.7 ± 22.8 Ma和 782.9 ± 13.2 Ma^[24]。

2.3 威海石岛花岗岩类

石岛杂岩体位于苏鲁超高压变质带的东端(图1b),侵位于威海地体的新元古代花岗质片麻岩中,呈岩株状产出,岩体展布与NNE向区域构造线展布方向一致。主要岩性由各种结构(细粒、中粒、粗粒及似斑状结构)的正长岩(分布面积约占石岛杂岩体总面积的40%)、石英正长岩和正长花岗岩(约占48%)组成。正长岩和石英正长岩合称为宁津所正长岩,正长花岗岩属槎山花岗岩,共同构成石岛杂岩体,总面积约224 km²。宁津所正长岩中的正长岩面积约占77%。前人对石岛杂岩体进行了年代学研究,锆石U-Pb、SHRIMP年龄及⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄范围在200~225 Ma^[26-32],认为石岛杂岩体主体形成于晚三叠世。

2.4 青岛崂山花岗岩类和日照大店石英正长岩类

崂山花岗岩类和大店石英正长岩类为同一地质时代岩浆活动的产物。崂山花岗岩类主要分布于鲁东南沿海地区,总面积约1 327 km²。以崂山岩体出露最全,规模最大,其次为河山岩体、大珠山岩体、小珠山岩体、龙须岛岩体、招虎山岩体及大泽山岩体等。崂山花岗岩类为二长花岗岩-正长花岗岩-碱长

花岗岩系列侵入岩,由酸性-偏碱性-碱性过渡,发育有不均匀分布的晶洞构造。根据野外观察到的花岗岩岩体间的穿插关系,结合其主要矿物组成,可将崂山花岗岩类划分为钙碱性和碱性两个岩套,共三种岩石类型。钙碱性岩套包括二长花岗岩和正长花岗岩,碱性岩套则以含碱性暗色矿物(钠闪石、霓石)为特征的碱性花岗岩为代表。其中,二长花岗岩分布面积约占总面积的40%,正长花岗岩约占36%,碱长花岗岩中常含有碱性暗色矿物钠闪石和霓石。大店石英正长岩类分布于日照莒县一带,为正长岩-石英正长岩系列侵入岩,少量正长花岗岩,面积约140 km²。主要岩体有大店岩体、白旄岩体、王家野疃岩体、独单山岩体及老山岩体。石英正长岩由正长石(55.93%~66.84%)、斜长石(13.37%~23.04%)、石英(5.52%~12.03%)组成,少量黑云母和角闪石。据崂山花岗岩类的24个同位素年龄测试结果,统计的同位素年龄范围是129.92~86.74 Ma,绝大部分年龄集中于115.4~90 Ma^[24-33],指示其形成于早、晚白垩世之间。

3 实验测试方法

3.1 岩石地球化学测试

岩石主、微量及稀土元素测试分析在国家地质实验测试中心完成,样品经人工粉碎至200目。主量元素采用X射线荧光法(XRF),微量及稀土元素利用电感耦合等离子体质谱法测试,仪器分别为X荧光光谱仪Philips PW2404和等离子质谱仪ELEMENT-I(Finnigan-MAT有限公司制造),精度优于1%和5%。依据标准为《电感耦合等离子体质谱方法通则(DZ/T0223-2001)》。

3.2 锆石U-Pb年代学测试

锆石的U-Pb测年均在北京离子探针中心完成。锆石的U-Pb年龄利用SHRIMP II技术测定。进行SHRIMP锆石U-Pb分析前,进行透、反射电子图像及阴极发光(CL)图像分析,以确定锆石颗粒的晶体形态、内部结构以及标定测年点。样品测试过程中尽量选择生长环带明显,无包裹体和裂纹的锆石晶体或避开锆石中的裂纹和包裹体。每测定3个样品点,测定一次标准锆石。详细的分析原理和流程、仪器工作调节和分析方法详见相关文献^[34-35]。测试中应用RSES参考锆石TEM(417 Ma)进行元素分馏校正,应用标准锆石91500(1 062.4 Ma)标定样品的U、

Th、Pb含量。普通铅根据实测的²⁰⁴Pb进行校正。年龄计算和图解使用SQUID(1.02)和ISOPLOT程序^[36]。

4 分析测试结果

4.1 岩石地球化学特征

4.1.1 四海山花岗岩类

本次采集的四海山正长花岗岩和摩天岭二长花岗岩主、微量元素测试结果列于表1。岩石化学主要特点是:富Fe、贫Mg, TFe_2O_3 为0.97%~3.34%(平均值2.04%), MgO 为0.16%~0.92%, $\text{TFe}_2\text{O}_3/(\text{TFe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$ 为0.78~0.84,与A型花岗岩具高铁镁比值的特征吻合;碱含量高,绝大多数样品 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 为9.23%~11.40%,碱度率指数AR变化于2.64~4.47之间,表现出偏碱性花岗岩特点。在 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ (TAS)图解中,分别落入正长岩-石英正长岩-花岗岩区域(图2a);在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 和 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解上,投点于橄榄安粗岩序列(钾玄岩)区域(图2b,d);在A/NK-A/CNK图解中,分别落入偏铝质区域和偏铝质-过铝质过渡区($\text{A/CNK}=0.87\sim1.02$,图2c);在花岗岩 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 分类图解和 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 、Zr、Nb-10000*Ga/Al分类图解上均投点于A型花岗岩区(图3a-d)。

岩石稀土总量 $81.92\times10^{-6}\sim433.07\times10^{-6}$,在稀土元素球粒陨石标准化图(图4a)上,表现出明显的轻稀土元素(LREE)富集和重稀土元素(HREE)相对亏损, LREE/HREE 比值为6.29~15.57, $(\text{La/Yb})_N=6.64\sim53.16$,多位于25.41~53.16区间,指示轻、重稀土元素发生了强烈分异,呈右倾型稀土模式,重稀土分馏较弱; δEu 为0.24~0.62,具有明显负铕异常,显示了A型花岗岩的普遍特征。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图4b),富集大离子亲石元素Rb、Th、K,强烈亏损Sr、Ba、Nb、P、Ti、Cr,其Y、Zr、Hf等高场强元素(HFSE)的含量也较高,相对于洋中脊玄武岩上,Sr、P、Ti呈显著的“V”形谷(图4b)。

4.1.2 岚山头花岗质片麻岩

岚山头片麻岩的主、微量元素测试结果列于表1。岩石化学分析结果显示以下特征:①富Si, SiO_2 含量为71.32%~78.60%(平均值75.67%),属于酸性岩类的化学组成范畴;富Fe贫Mg, TFe_2O_3 含量为1.02%~3.95%(平均值2.04%), MgO 含量为0.01%~1.00%(平均值0.24%), $\text{TFe}_2\text{O}_3/(\text{TFe}_2\text{O}_3+$

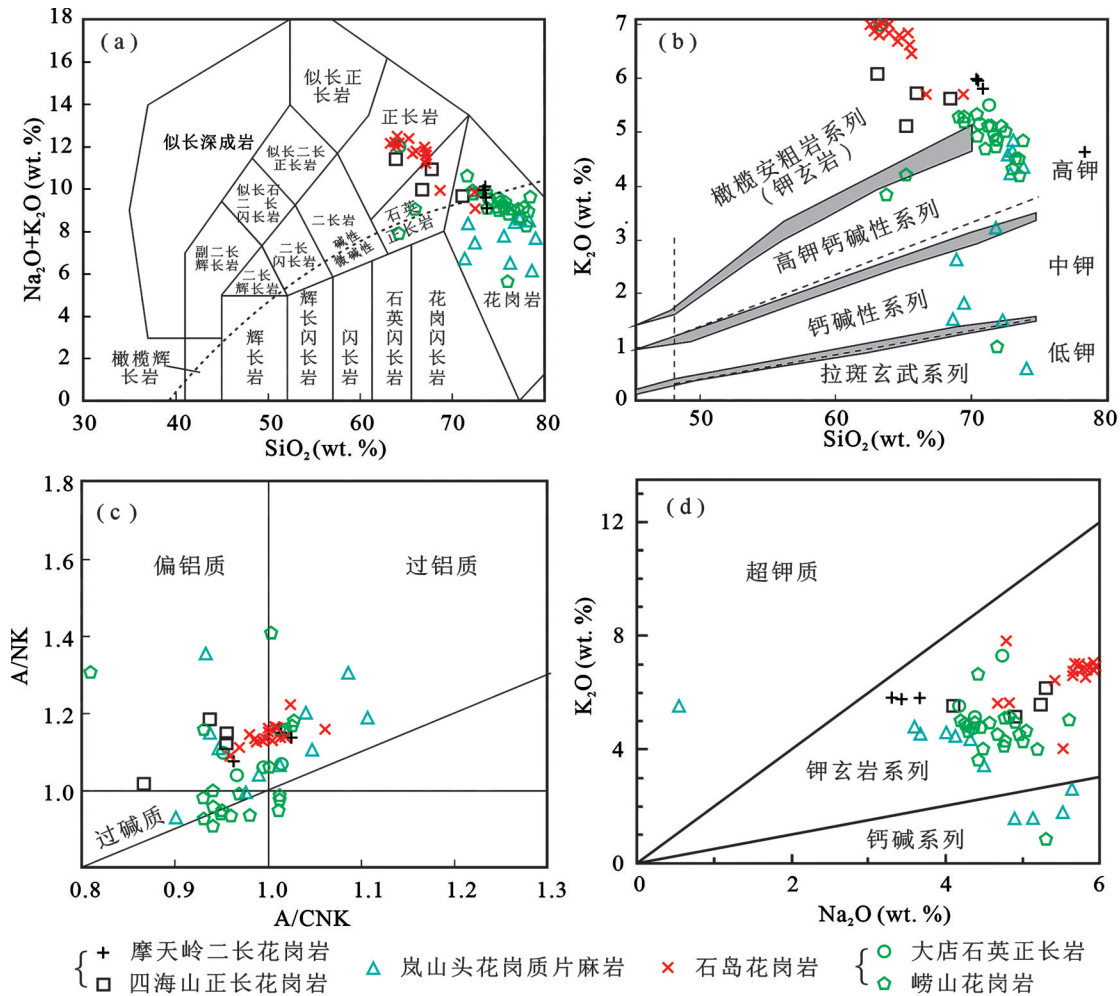


图2 花岗岩的 SiO_2 -($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) (TAS)图解(a), K_2O - SiO_2 图解(b), A/NK - A/CNK 图解(c)和 K_2O - Na_2O 图解(d)

Fig.2 Total alkali vs. SiO_2 (TAS) diagram(a); SiO_2 vs. K_2O diagram(b),

A/NK vs. A/CNK diagrams(c).and K_2O vs. Na_2O diagram(d)

(底图据参考文献[37-39];图中崂山花岗岩数据引自参考文献[33,40];

石岛花岗岩数据引自参考文献[32,41-44]中石英正长岩和正长花岗岩数据)

MgO)含量为0.80~1.00,与A型花岗岩具高铁镁比值的特征吻合^[1];②碱含量高, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量介于6.05%~8.59%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为0.76~9.61,在TAS图解(图2a)中均投入花岗岩范围。碱度率指数AR变化于2.40~7.78之间,表现出碱性花岗岩特点,可与国外已报道的其他A型花岗岩类比。岩石的碱铝指数($\text{AKI}=(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$)为0.74~1.08,多数接近和高于Whalen等^[1]厘定的A型花岗岩平均值(0.95);③铝饱和指数A/CNK为0.90~1.11,投点于偏铝质及附近区域内(图2c)。与同造山花岗岩化学成分平均值比较,岚山头片麻岩套 SiO_2 、 K_2O 含量较高, TiO_2 、 Al_2O_3 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$ 、 MgO 、 CaO 含量较低。在 K_2O - SiO_2 图解上,样品点多数位于高钾钙碱性(高钾)系列区,少数位于钙碱性系列和拉斑玄武系列(图

2b);在 K_2O - Na_2O 图解上,均落入钾玄岩系列区(图2d);与同造山花岗岩相比,较富Si。在花岗岩 Na_2O - K_2O 分类图解上,投点于A型和I型花岗岩区(图3a);在花岗岩 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 、 Zr 、 Nb -10000* Ga/Al 分类图解上大多投点于A型花岗岩区(图3b-d)。

稀土元素分析结果(表1)显示,岚山头片麻岩稀土总量变化较大,稀土总量为 $25.95\times 10^{-6}\sim 491.02\times 10^{-6}$;表现出明显的LREE富集和HREE相对亏损, $\text{LREE}/\text{HREE}=2.75\sim 21.07$, $(\text{La}/\text{Yb})_N=2.34\sim 25.71$;轻稀土较重稀土分馏明显, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 和 $(\text{Ga}/\text{Yb})_N$ 值分别为0.90~10.22和0.64~2.35;铕元素呈现明显负异常, $\delta\text{Eu}=0.13\sim 0.96$,表明经历了较为显著的斜长石分离结晶作用。岩石的球粒陨石标准化曲线呈明显的右倾“V”字形(图4a),与典型S型花岗岩常表

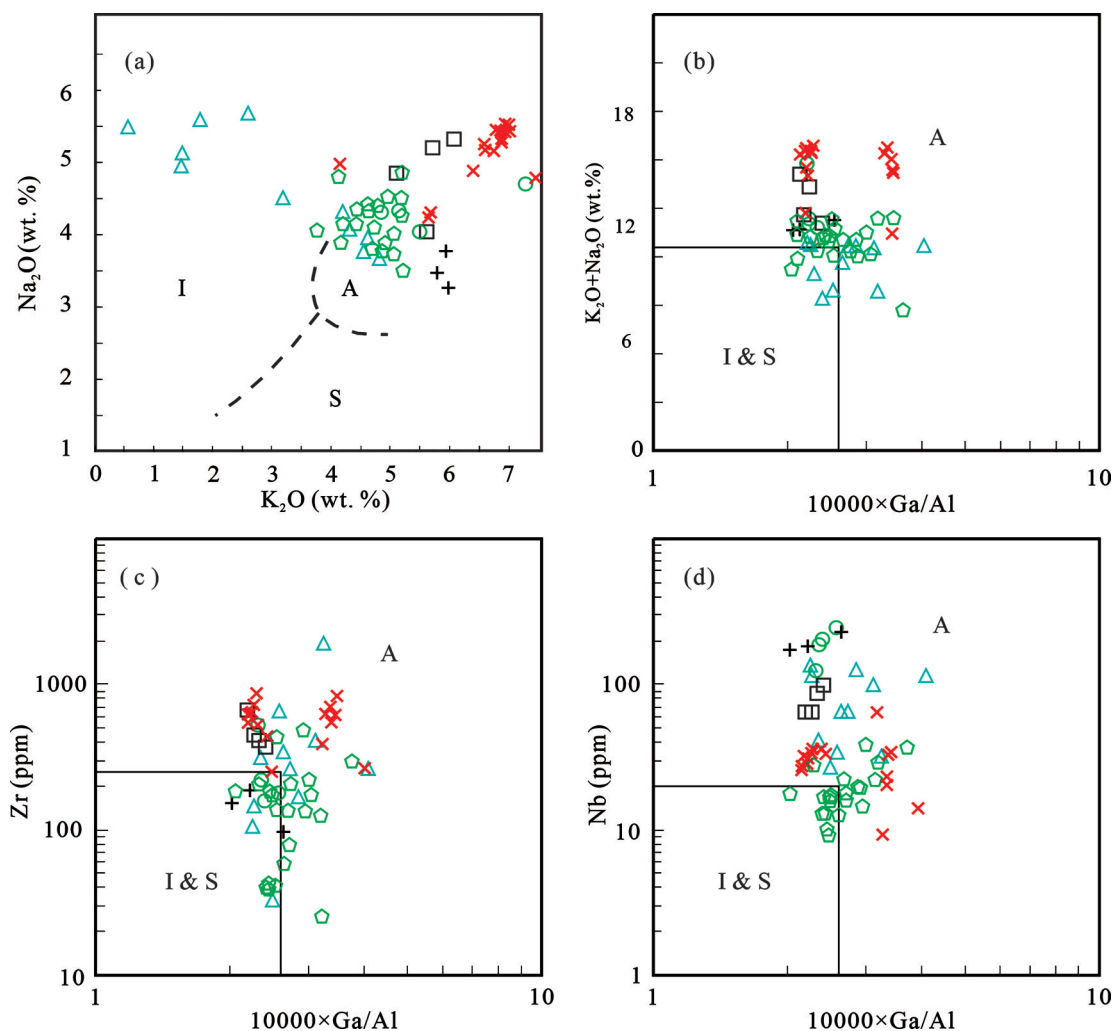


图3 花岗岩 Na_2O - K_2O 分类图解(a)和 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 、 Zr 、 Nb - $10000*\text{Ga}/\text{Al}$ 分类图解(b-d)(底图据[1,45])

Fig.3 Na_2O vs. K_2O and $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 、 Zr 、 Nb - $10000*\text{Ga}/\text{Al}$ discrimination diagrams for the granite

(样品图例同图2;图中崂山花岗岩数据据参考文献[33,40];

石岛花岗岩数据引自参考文献[32,41-44]中石英正长岩和正长花岗岩数据)

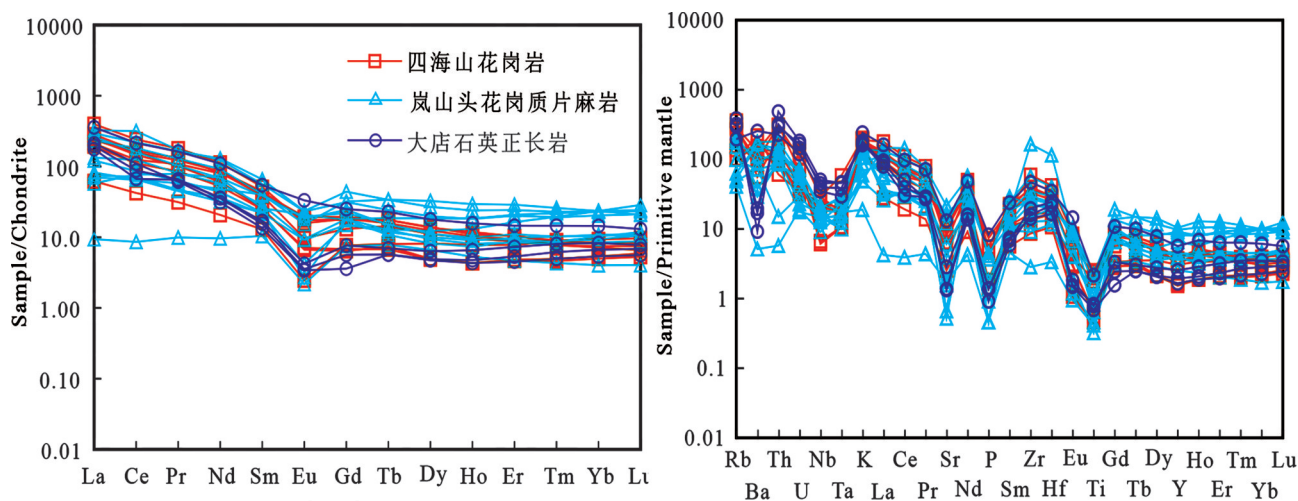


图4 花岗岩球粒陨石标准化稀土配分模式图解(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(据参考文献[46,47])

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-mantle-normalized trace element spidergrams (b) for the granite

表1 花岗岩类的全岩主量元素(%),微量元素(ug/g)和稀土元素(μg/g)化学分析结果

Table 1 Major (wt%), trace ($\times 10^{-6}$), and REE analysis of the granites

元素及特征值		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	CO ₂	LOS	Total	Na ₂ O+K ₂ O	Na ₂ O/K ₂ O	A/CNK
四海山 花岗岩类	MTL-1	74.32	0.12	13.62	0.74	0.63	0.04	0.32	0.71	3.47	5.80	0.03	0.38	0.17	0.38	100.73	9.27	0.60	1.02
	MTL-2	73.68	0.14	13.60	1.16	0.31	0.04	0.27	0.86	3.26	5.98	0.04	0.46	0.17	0.40	100.37	9.24	0.55	1.01
	MTL-3	73.84	0.10	13.59	0.77	0.20	0.04	0.16	0.80	3.77	5.95	0.03	0.18	0.17	0.19	99.79	9.72	0.63	0.96
	SHS-1	71.07	0.38	14.29	2.38	0.23	0.06	0.53	1.22	4.04	5.62	0.10	0.34	0.17	0.36	100.79	9.66	0.72	0.95
	SHS-2	66.71	0.53	16.00	1.65	1.69	0.08	0.92	1.95	4.85	5.11	0.16	0.36	0.17	0.28	100.46	9.96	0.95	0.94
	SHS-3	67.75	0.43	15.00	0.76	1.97	0.07	0.76	1.40	5.20	5.72	0.12	0.32	0.09	0.34	99.93	10.92	0.91	0.87
	SHS-4	63.86	0.55	17.60	1.56	1.76	0.07	0.75	1.69	5.32	6.08	0.12	0.48	0.09	0.34	100.27	11.40	0.88	0.96
岚山头 花岗质 片麻岩	LST-1	76.24	0.49	10.77	2.51	1.44	0.09	0.20	0.91	4.94	1.47	0.02	0.12	0.34	0.29	99.83	6.41	3.36	0.95
	LST-2	76.75	0.20	12.34	0.84	0.37	0.03	0.16	0.34	3.79	4.55	0.04	0.48	0.04	0.37	100.30	8.34	0.83	1.05
	LST-3	78.60	0.09	11.06	0.75	0.95	0.06	0.41	1.19	5.48	0.57	0.01	0.50	0.05	0.40	100.12	6.05	9.61	0.94
	LST-4	77.29	0.07	12.01	0.86	0.16	0.04	0.07	0.32	3.68	4.82	0.01	0.26	0.07	0.36	100.02	8.50	0.76	1.01
	LST-5	71.68	0.36	14.60	1.56	0.70	0.09	0.55	1.03	5.68	2.60	0.10	0.60	0.18	0.71	100.44	8.28	2.18	1.04
	LST-6	71.32	0.48	13.61	2.05	1.60	0.10	1.00	2.49	5.13	1.49	0.08	0.90	0.34	1.06	101.65	6.62	3.44	0.93
	LST-7	77.21	0.10	12.00	0.68	0.41	0.06	0.03	0.32	3.97	4.62	0.01	0.18	0.07	0.15	99.81	8.59	0.86	0.99
	LST-8	77.00	0.18	10.82	2.15	0.42	0.07	<0.01	0.20	4.31	4.20	0.01	0.02	0.04	0.01	99.43	8.51	1.03	0.90
	LST-9	78.29	0.14	11.35	1.47	0.31	0.10	<0.01	0.12	4.09	4.32	0.01	0.08	0.02	0.02	100.32	8.41	0.95	0.98
	LST-10	75.57	0.25	12.90	1.00	0.56	0.08	0.13	0.44	4.50	3.19	0.03	0.56	0.20	0.60	100.01	7.69	1.41	1.11
	LST-11	72.42	0.37	14.50	1.53	0.64	0.05	0.48	1.23	5.58	1.79	0.09	0.80	0.18	0.80	100.46	7.37	3.12	1.09
大店石英 正长岩类	DD-1	64.24	0.47	17.15	1.16	1.83	0.10	1.09	1.31	4.70	7.29	0.18	0.46	0.17	0.58	100.73	11.99	0.64	0.95
	DD-2	74.90	0.17	13.10	0.55	0.63	0.04	0.54	0.52	4.04	5.50	0.03	0.26	0.17	0.26	100.71	9.54	0.73	0.97
	DD-3	75.59	0.15	13.08	0.76	0.41	0.05	0.07	0.44	4.31	4.85	0.02	0.33	0.26	0.42	100.74	9.16	0.89	0.99
	DD-4	73.98	0.18	13.57	0.80	0.54	0.06	0.13	0.37	4.33	5.15	0.03	0.22	0.17	0.14	99.67	9.48	0.84	1.01
元素及特征值		A/NK	Sr	Zr	Ba	V	Zn	Cr	Co	Ni	Cu	Ga	Rb	Nb	Ta	Hf	Th	U	Sc
四海山 花岗岩类	MTL-1	1.13	89.70	152.00	677.00	4.66	20.20	6.53	1.03	2.28	4.65	14.60	172.00	4.74	0.44	4.98	25.90	2.17	1.38
	MTL-2	1.15	171.00	186.00	934.00	6.00	24.70	4.75	1.45	2.43	4.54	16.00	182.00	4.36	0.43	5.24	26.50	1.47	2.63
	MTL-3	1.07	53.60	96.40	390.00	6.32	11.00	5.08	0.80	1.92	4.93	19.00	228.00	20.70	2.40	3.31	17.10	2.75	2.05
	SHS-1	1.12	134.00	370.00	697.00	16.30	38.40	6.92	3.04	3.20	9.06	18.20	98.60	17.20	0.81	8.17	8.40	0.64	5.66
	SHS-2	1.18	253.00	448.00	1077.00	27.40	49.00	8.20	5.15	5.30	15.70	19.20	64.50	17.50	0.67	9.14	8.38	0.70	5.00
	SHS-3	1.02	187.00	413.00	964.00	18.10	40.60	7.18	3.70	3.59	10.70	18.50	86.60	14.60	0.73	9.22	11.10	0.88	6.00
	SHS-4	1.15	207.00	666.00	1529.00	21.80	39.60	5.54	3.98	3.69	13.70	20.40	64.20	20.70	0.71	13.00	5.18	0.72	6.75
岚山头 花岗质 片麻岩	LST-1	1.11	355.00	1853.00	510.00	15.00	72.30	5.69	0.95	1.61	6.79	18.50	31.00	9.59	0.51	35.50	1.28	0.63	7.07
	LST-2	1.10	128.00	141.00	771.00	7.00	24.10	6.53	0.99	1.33	6.14	14.80	111.00	14.70	1.10	4.09	8.50	1.57	1.59
	LST-3	1.15	37.00	31.80	36.00	17.00	27.10	11.80	2.65	6.53	6.04	14.60	26.00	6.47	0.71	1.04	0.49	0.40	6.73
	LST-4	1.06	39.00	102.00	600.00	5.00	19.00	6.33	0.96	2.05	4.78	14.30	131.00	9.03	0.95	3.62	11.90	0.99	3.87
	LST-5	1.20	343.00	254.00	1236.00	30.00	55.80	7.73	3.25	2.94	7.44	21.10	63.00	16.00	0.73	6.35	15.40	1.33	3.63
	LST-6	1.35	452.00	634.00	1143.00	46.00	67.60	18.50	6.79	7.92	17.80	18.60	33.00	13.20	0.71	12.40	10.30	1.49	13.70
	LST-7	1.04	33.00	163.00	204.00	5.00	39.40	4.00	0.63	1.36	6.21	18.10	122.00	14.30	1.19	6.08	7.72	0.90	1.43
	LST-8	0.93	14.00	255.00	270.00	5.00	78.90	4.69	0.42	0.99	7.54	23.40	111.00	10.50	0.41	5.95	7.24	0.37	1.18
	LST-9	0.99	11.00	398.00	265.00	5.00	98.90	4.47	0.38	0.78	5.20	18.70	96.00	12.40	0.41	9.00	9.07	0.48	2.69
	LST-10	1.19	82.00	332.00	497.00	14.00	41.50	4.87	1.00	1.39	7.54	18.00	63.00	10.50	0.62	7.38	7.37	1.12	2.45
	LST-11	1.30	255.00	303.00	1162.00	22.00	29.40	5.50	3.90	2.50	11.50	18.00	40.00	9.92	0.66	7.05	11.90	1.27	4.81
大店石英 正长岩类	DD-1	1.10	277.00	524.00	1782.00	31.90	57.80	5.84	2.31	2.73	8.94	21.00	124.00	24.80	1.21	10.80	19.30	2.50	7.43
	DD-2	1.04	60.30	158.00	137.00	4.55	11.40	4.08	0.78	1.23	4.12	16.60	204.00	28.40	1.58	5.10	25.30	3.48	1.82
	DD-3	1.06	28.20	179.00	64.40	5.45	52.30	4.23	0.78	1.50	4.60	17.80	245.00	36.10	1.87	6.74	41.20	3.85	1.71
	DD-4	1.07	28.30	220.00	119.00	5.14	16.60	4.66	0.83	2.01	5.28	16.90	187.00	32.10	1.92	7.58	27.10	3.05	1.97
元素及特征值		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	δEu	LREE/HREE	ΣREE
四海山 花岗岩类	MTL-1	6.97	59.80	89.40	10.40	31.40	4.83	0.52	1.75	0.32	1.57	0.31	0.98	0.15	1.04	0.17	0.45	31.22	202.64
	MTL-2	7.48	76.20	118.00	12.40	36.20	4.98	0.49	1.66	0.35	1.59	0.31	1.01	0.16	1.12	0.19	0.42	38.85	254.66
	MTL-3	13.90	19.20	34.10	3.82	12.40	2.51	0.18	1.98	0.38	2.61	0.56	1.63	0.29	1.95	0.31	0.24	7.44	81.92
	SHS-1	14.60	87.50	135.00	16.10	49.20	7.54	0.71	3.40	0.68	3.57	0.69	1.83	0.25	1.50	0.21	0.37	24.41	308.18
	SHS-2	17.10	73.90	126.00	14.90	51.10	8.70	1.28	4.62	0.83	4.38	0.85	2.17	0.28	1.74	0.27	0.56	18.22	291.02
	SHS-3	14.60	123.00	195.00	21.90	67.80	10.00	1.16	4.70	0.75	4.01	0.74	1.96	0.25	1.56	0.24	0.45	29.48	433.07
	SHS-4	16.70	65.20	100.00	13.20	47.90	8.43	1.42	5.00	0.83	4.48	0.79	2.19	0.29	1.73	0.26	0.62	15.17	251.72
岚山头 花岗质 片麻岩	LST-1	18.20	17.90	62.30	9.58	41.40	7.42	1.43	5.69	0.72	3.61	0.67	1.94	0.28	1.95	0.34	0.65	9.21	155.23
	LST-2	20.40	37.60	69.50	7.67	26.20	4.34	0.67	3.89	0.56	3.22	0.65	2.05	0.33	2.20	0.34	0.49	11.03	159.22
	LST-3	11.60	2.91	6.94	1.21	5.78	2.03	0.16	1.95	0.37	2.13	0.38	0.98	0.14	0.84	0.13	0.24	2.75	25.95
	LST-4	29.80	23.40	57.30	5.67	21.70	4.20	0.31	3.93	0.61	3.95	0.94	3.43	0.63	4.91	0.92	0.23	5.83	13

现出的“海鸥型”稀土配分形式有明显区别,而相似于四分组效应A型花岗岩的稀土配分型式。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图4b),岚山头片麻岩显示了富集大离子亲石元素Rb、Th、K、Nd,亏损Sr、P、Ti、Ba、Nb,相对于洋中脊玄武岩,Sr、P、Ti呈显著的“V”型谷(图4),指示成岩过程中存在较显著的斜长石、磷灰石和钛铁矿分离结晶。岩石富Ga, $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 值为2.24~4.09,多数高于whalen等^[1]给出的A型花岗岩下限值(2.6),而且Y、Zr、Hf等高场强元素的含量也较高。

4.1.3 石岛花岗岩类

前人对石岛花岗岩类进行了详细的岩石学和地球化学特征研究,本文对石岛花岗岩类地球化学数据进行了收集和进一步研究^[32,41-44],主量元素化学成分中 SiO_2 含量为63.13~72.41%, K_2O 含量为4.1~7.82%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=0.82 \sim 1.81\%$ (多数大于1),显示富钾特征。在TAS图解上,投影在二长岩、正长岩和花岗岩区,且位于碱性岩系列区(图2a);在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上,投点于橄榄安粗岩(钾玄岩)系列区和高钾钙碱性系列区(图2b);在A/NK-A/CNK图解中,石岛石英正长岩样品落入偏铝质—过铝质过渡区域(图2c);在 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解上,投入钾玄岩系列区(图2d)。在 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解上,投点于A型花岗岩区(图3a);在花岗岩 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 、Zr、Nb-10000*Ga/Al分类图解上均投点于A型花岗岩区(图3b-d)。显示的地球化学特征与Eby^[8]所定义的A型花岗岩类似,表现为贫水,碱性特征。

稀土元素特征显示LREE和LILE富集,亏损HFSE,显著的Eu负异常。亏损Ti、Ba和Sr显示石英正长岩是经过了高度分异的岩石。微量元素具有Nb、Ta和Ti的负异常和Pb的正异常^[32,41-42]。

4.1.4 大店石英正长岩类和崂山花岗岩类

大店石英正长岩类的主、微量元素测试结果列于表1。岩石地球化学成分在 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ (TAS)图解上,投点于正长岩和花岗岩区(图2a);在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中,投点于橄榄安粗岩(钾玄岩)系列区和高钾钙碱性岩区(图2b);在A/NK-A/CNK图解中,多投在偏铝质和过铝质过渡区(图2c);在 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解中,投点于钾玄岩系列区(图2d);在 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解中,投点于A型花岗岩区(图3a);在花岗岩 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 、Zr、Nb-10000*Ga/Al分类图解上多数投点于A型花岗岩区(图3b)。岩石地球化学成分特征

表现为贫钙(CaO 为0.37%~1.31%)、富碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 为9.16%~11.99%)的特点。

稀土元素地球化学总体特征表现为:稀土总量较高,轻稀土分馏明显,重稀土分馏较弱,具有负铈异常(图4a)。在稀土元素球粒陨石标准化图上,岩石稀土元素总量为 $146.95 \times 10^{-6} \sim 404.01 \times 10^{-6}$,表现出明显的LREE富集和HREE相对亏损,LREE/HREE比值为17.91~30.44,呈LREE高度富集的模式(图4a); $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=23.58 \sim 32.81$,指示轻、重稀土元素发生了强烈分异; δEu 为0.34~0.84,显示出明显的铈负异常,显示了A型花岗岩的普遍特征。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图4b),微量元素显示了富集大离子亲石元素Rb、Th、K,亏损Sr、Ba、P、Ti、Cr,其Y、Zr、Hf等高场强元素的含量较高。在相对于洋中脊玄武岩标准化的蛛网图上,Sr、Ba、P、Ti呈显著的“V”型谷(图4b),指示成岩过程中存在较显著的斜长石、磷灰石和钛铁矿分离结晶。

前人测试的崂山花岗岩类相关数据^[33,40]显示, SiO_2 含量为64.79~77.88%, K_2O 含量为0.95~3.74%,主要介于3.74~3.74%。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=0.87 \sim 1.29\%$,多数大于1,具有富钾特征。崂山花岗岩类主元素化学成分,在TAS图解上多数投点于花岗岩区,少数在石英正长岩区(图2a);在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中,多投点于高钾钙碱性系列区的右侧和橄榄安粗岩系列(钾玄岩)区(图2b);在A/NK-A/CNK图解中,多投在偏铝质和过铝质过渡区(图2c);在 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解中(图2d),投点于钾玄岩系列区;在 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解上投点于A型花岗岩区(图3a);在花岗岩 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 、Zr、Nb-10000*Ga/Al分类图解上多数投点于I-A型花岗岩过渡区(图3b)。岩石地球化学成分表现为高硅(SiO_2 为64.79~77.88%)、富碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 为5.71~10.15%)、贫钙(CaO 为0.37~4.57%,多数小于1%)、低镁(MgO 为0.14~2.34%,多数小于1%)的A型花岗岩特点。

崂山花岗岩类碱性岩套中的碱性花岗岩,其大离子亲石元素和高场强元素Ga、Nb、Hf、Zr、Y及Ga/Al比值等明显高于钙碱性岩套岩石,而同国内外其它A型花岗岩成分相当。崂山正长花岗岩和碱性花岗岩的微量元素曲线均与碰撞后花岗岩相似^[48],反映其在相对宁静的造山后环境下形成。

崂山花岗岩类稀土元素总量较高,LREE分馏明

显,HREE分馏较弱,反映在稀土元素分布形式上,由LREE相对平滑的右倾斜线,变化为铈亏损强烈、HREE平缓的右倾“V”型(图4b),显示了A型花岗岩的普遍特征^[40]。

4.2 锆石U-Pb年代学测试结果

对四海山正长花岗岩样品进行锆石SHRIMP同位素年龄分析,测试结果见表2,样品锆石多数为自形-半自形,晶形较完整,表面干净光滑。多数CL图像显示内部振荡环带结构发育,且具有较高Th/U比值(0.56~0.92,表2),具备岩浆结晶锆石特征。

四海山正长花岗岩样品的10个分析点均投在谐和线上(图5),谐和度较高,说明原锆石形成后未遭受热事件改造而导致铅丢失,可以代表锆石结晶年龄。因获取到的均为新太古代年龄,因此采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb的年龄值进行计算,年龄范围2 507±20 Ma~2 553±14 Ma(表2),加权平均年龄值为2 533±8 Ma(MSWD=0.73)(图5),代表了岩浆侵位年龄,属

新太古代晚期。

5 讨论

5.1 岩石成因及构造环境

大量研究表明,花岗岩成因类型不仅反映了岩浆源区性质,而且还是岩浆形成构造环境的一种判别标志^[9,49-50]。A型花岗岩被普遍认为是伸展环境的重要岩石学标志,但其伸展环境、规模、深度等差异往往会导致A型花岗岩具有不同的特征^[51]。因此,Eby等^[9]进一步将A型花岗岩划分为A₁和A₂两种类型,其中A₁型花岗岩代表幔源熔体分离结晶成因岩石,主要形成于非造山环境(大陆裂谷或板内拉伸);A₂型花岗岩代表地壳部分熔融成因岩石,主要形成于造山后环境^[52]。目前国内外学者对A型花岗岩成因模式主要有以下几种认识:①幔源玄武质岩浆或碱性岩浆的结晶分异^[53];②壳-幔混合成因^[54];③富F/Cl麻粒岩相下地壳的低程度部分熔融^[45];④硅铝质

表2 四海山正长花岗岩锆石U-Pb同位素数据
Table 2 U-Pb isotope data of zircon from the Sihaishan syenogranite

点号	测试值/10 ⁻⁶				同位素比值						年龄/Ma				误差相关	
	U	Th	²⁰⁶ Pb*	Th/U	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	1σ	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±σ	系数	
1	77	42	31.3	0.56	0.166 5	0.86	10.87	1.8	0.473 5	1.6	2 499	34	2 523	15	0.883	
2	45	35	18.6	0.8	0.164 9	1.2	10.85	2.1	0.477 0	1.8	2 514	37	2 507	20	0.84	
3	131	102	54.6	0.81	0.168 6	0.62	11.26	1.6	0.484 7	1.5	2 548	32	2 540	10	0.926	
4	159	131	65.1	0.85	0.167 0	0.6	10.98	1.6	0.477 0	1.5	2 514	31	2 527	10	0.928	
5	119	93	49.4	0.81	0.166 7	0.67	11.06	1.7	0.481 4	1.5	2 534	32	2 525	11	0.915	
6	181	124	74.4	0.71	0.167 6	0.58	11.07	1.6	0.479 0	1.5	2 523	31	2 534	10	0.93	
7	77	51	32.4	0.69	0.167 7	0.84	11.23	1.8	0.485 5	1.6	2 551	34	2 535	14	0.889	
8	55	41	22.1	0.77	0.166 3	0.1	10.69	2.2	0.466 3	1.8	2 467	38	2 520	19	0.85	
9	150	76	61.5	0.52	0.168 5	0.69	11.11	1.7	0.478 4	1.5	2 520	31	2 542	12	0.908	
10	111	99	46.5	0.92	0.169 6	0.82	11.4	1.7	0.487 5	1.5	2 560	33	2 553	14	0.882	

注:*代表放射性

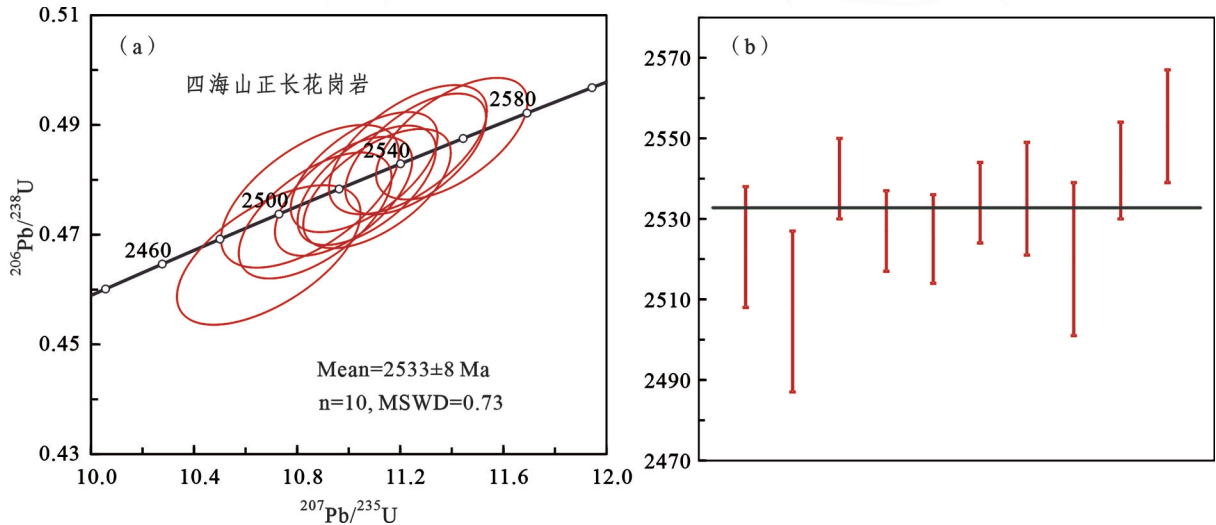


图5 四海山正长花岗岩同位素年龄图

Fig.5 U-Pb isotope Concordia Diagram of zircons from the Sihaishan syenogranite

中-上地壳的部分熔融^[55]。

四海山花岗岩类的地球化学特征组显示为A型花岗岩。在Rb/Nb-Y/Nb图解和Nb-Y-3Ga图解(图6)中投点于A₁与A₂型花岗岩之间或A₂型花岗岩边缘。岩石中暗色矿物含少量黑云母,不含霓石、钠闪石等碱性暗色矿物,具有铝质A型花岗岩的特点(A₂型花岗岩),因此认为四海山花岗岩类属A₂型花岗岩。在Nb-Y、Yb-Ta、Rb/30-Hf-3Ta构造环境判别图解中,投点于火山弧+同碰撞花岗岩区(图7a-c),显示了“弧”岩浆作用的地球化学信息。在R₁-R₂图解中落入造山晚期区域(图7d)。该类花岗岩与Eby^[9]定义的A₂型花岗岩相似,一般认为这种花岗岩是与陆-陆碰撞或岛弧岩浆作用有关的花岗岩,形成于造山后期岩石圈拉张减薄环境,与地幔物质的上涌底侵作用密切相关。

岚山头片麻岩显示了典型A型花岗岩地球化学特征。利用Whalen等^[1]提出的以Ga/Al值为基础的多种图解进行判断,样品点多数投在A型花岗岩区(图3)。岚山头片麻岩早期岩体与晚期岩体在岩石学、矿物学和岩石化学成分上有明显差异。早期岩体为正长花岗质片麻岩,暗色矿物为普通的黑云母和白云母;晚期岩体为碱性含霓石花岗质片麻岩,以发育霓石、钠闪石等碱性暗色矿物为标志。在主要元素上,早期岩体富铝,接近于铝质A型花岗岩(A₂型);晚期岩体富碱,为碱性A型花岗岩(A₁型)。薛怀民等^[57]对胶东东部地区碱性A型花岗岩研究认为,其

成因可以用I型花岗质岩浆形成后,脱水的紫苏辉石质残留下地壳在温度大于900℃、与俯冲有关的构造环境下发生部分熔融的模型解释。将花岗质片麻岩投影在Rb/Nb-Y/Nb图解和Nb-Y-3Ga三角投影图上(图6),样品多数落在A₂区,少量落在A₁区。在构造环境判别图解中(图7a-c),样品投点集中于火山弧+同碰撞花岗岩区和火山弧花岗岩区;在R₁-R₂图解中(图7d),多数样品投点于造山期后花岗岩附近。A₁型花岗岩的出现,说明岚山头片麻岩具有形成于非造山环境特点。

前人对石岛花岗岩类进行了深入研究^[41],地球化学成分指示,其物质来源于富集岩石圈地幔源区,由于不同阶段熔融并经历不同程度结晶分异和下地壳同化混染导致形成不同成分的侵入岩。在有关地球化学成分分类图解中,样品点投在A型花岗岩区(图3);在Rb/Nb-Y/Nb图解上多投入A₁型花岗岩区,但靠近A₂型花岗岩区(图6a),而在Nb-Y-3Ga三角投影图上则多投入A₂型花岗岩区,少量投入A₁型花岗岩区(图6b)。在Nb-Y、Yb-Ta、Rb/30-Hf-3Ta构造环境判别图解中,多投点于板内花岗岩区,少量投入火山弧花岗岩区(图7a-c)。在R₁-R₂图解中落入造山晚期区域(图7d),说明石岛花岗岩类形成于造山晚期构造环境,可能是由于扬子与华北板块碰撞后,受交代的、难熔岩石圈地幔部分熔融所造成,属后造山花岗岩类,岩浆来源于没有新的地幔物质加入的富集岩石圈地幔源区^[22]。

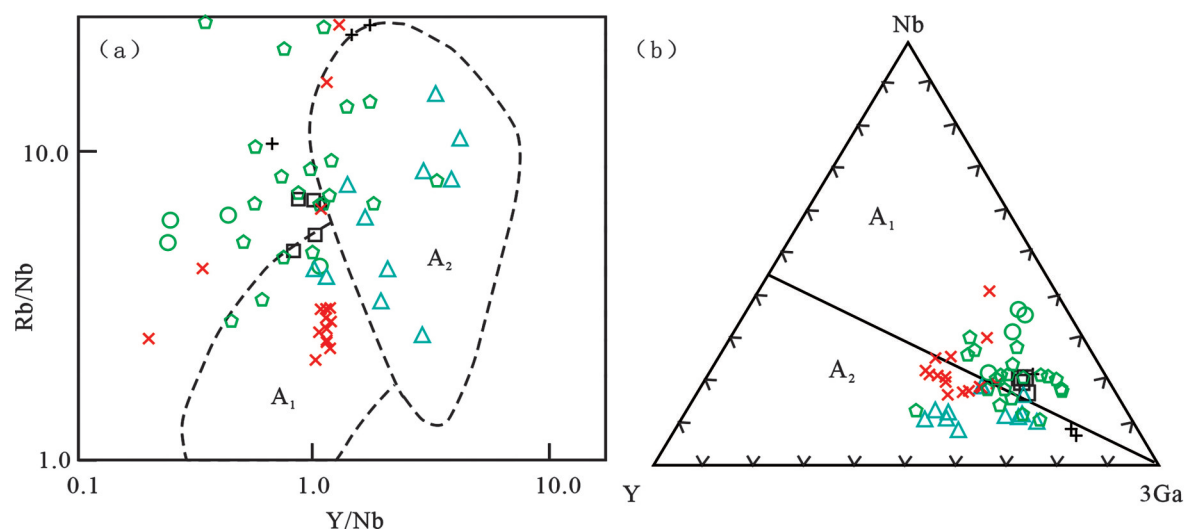


图6 花岗岩类Rb/Nb-Y/Nb图解(a)和Nb-Y-3Ga分类图解(b)

Fig.6 Rb/Nb-Y/Nb diagram (a) and Nb-Y-3Ga diagram (b) of granites

(底图分别据参考文献[9,45],样品图例同图2;图中崂山花岗岩类数据据参考文献[33,40];

石岛花岗岩类数据引自参考文献[32,41-44]中石英正长岩和正长花岗岩数据)

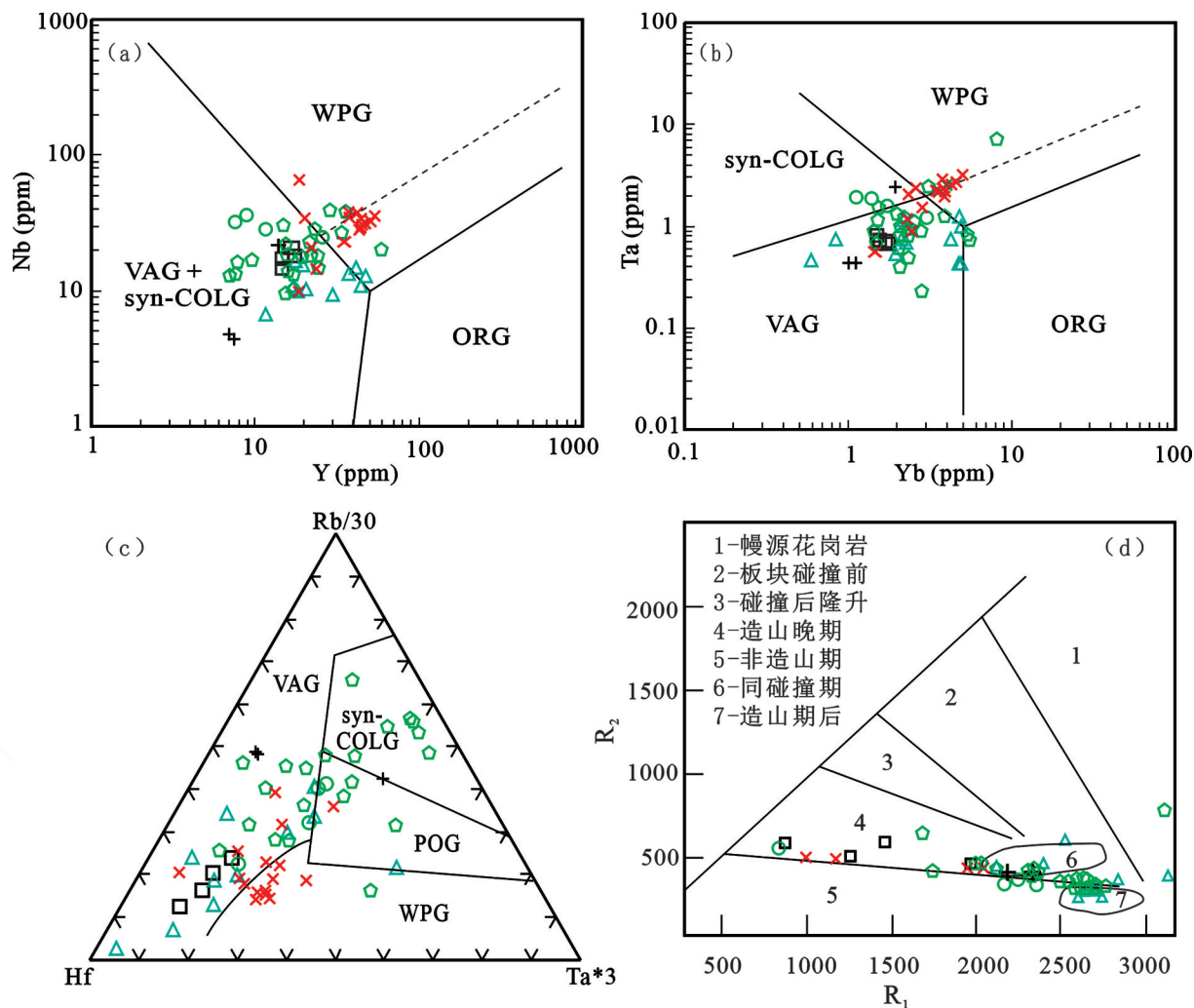


图7 花岗岩构造环境判别图解(底图据[56])

Fig.7 Discriminant diagram of granite tectonic environment (base diagram referenced [56])

(样品图例同图2,a-c中石岛花岗岩类数据引自[41,42,44];d中石岛花岗岩类数据引自[43];图中崂山花岗岩类数据引自[33,40])

大店石英正长岩类显示了A型花岗岩地球化学特征,在花岗岩的成因判别图解中,分别多投点于A型花岗岩区(图3)和A₁与A₂型花岗岩区之间(图6),岩石、矿物组成特点具有铝质A型花岗岩特征。因此认为,大店石英正长岩类属A₂型花岗岩,岩石形成于拉张环境。崂山花岗岩类具A型花岗岩的典型地球化学特征,在Rb/Nb-Y/Nb图解和Nb-Y-3Ga三角投影图上(图6),样品在A₁-A₂区均有分布。岩石矿物组成显示,崂山花岗岩类早期单元为以正长花岗岩为主的A₂型花岗岩,晚期单元为以碱性矿物为标志的A₁型花岗岩。在Nb-Y、Yb-Ta、Rb/30-Hf-3Ta构造环境判别图解中,多投点于火山弧+同碰撞花岗岩区和火山弧区(图7a-c),显示了“弧”岩浆作用的地球化学信息。在R₁-R₂图解中落入造山晚期-同碰撞期-造山期后区域(图7d)。据前人研究成果^[24,40],崂山花岗

岩类属正常类型δ¹⁸O花岗岩类;钙碱性岩套二长花岗岩和正长花岗岩类的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值为0.706 7~0.708 3,与玄武岩源区岩浆岩相似,也与苏鲁地区变质基底的锆初始值(0.706 7~0.707 2)类似;碱性花岗岩的I_s值则偏高,为0.712 9~0.714 6,可能与岩浆期后较强的水岩作用或地壳物质的混染有关;ε_{Nd}(t)=-18.4~-15.5,略低于变质围岩-苏鲁超高压带中镁铁质岩石的ε_{Nd}(t)值(-18.4~-15.5),指示崂山花岗岩类可能起源于下地壳古老基底岩石。崂山花岗岩类与其他地区A型花岗岩相比,显示了富集地幔趋势,且与基底岩石有明显的渊源关系。同位素地球化学特征表明,崂山花岗岩类既具有明显的壳源来源特点,又有幔源影响的信息。地质产状分析表明,崂山花岗岩类与伟德山花岗岩类紧密伴生,形成I-A型复合花岗岩体。综合认为,在地幔岩浆侵位通过壳、幔岩浆混合作用

形成伟德山花岗岩类的过程中,下地壳古老基底岩石重熔,产生 SiO_2 饱和的崂山花岗岩类。崂山花岗岩类晚期单元中的A₁型花岗岩,指示其形成于非造山环境。

5.2 岩浆活动时代及其构造意义

5.2.1 四海山花岗岩类与早前寒武纪基底克拉通化

本文测试的四海山花岗岩的同位素年龄是 $2533 \pm 8 \text{ Ma}$,指示其形成于新太古代末。在鲁西地块,与四海山花岗岩类形成时代接近的新太古代晚期花岗岩类侵入岩还包括:同位素年龄为 $2557 \sim 2514 \text{ Ma}$ 的峰山花岗岩序列和 $2530 \sim 2503 \text{ Ma}$ 的傲徕山花岗岩序列^[58]。峰山花岗岩类为石英闪长岩-英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩岩石组合,属TTG花岗岩类,显示了奥长花岗岩系地球化学特征^[22]。傲徕山花岗岩类是鲁西分布最广的前寒武纪侵入岩,由多种不同结构和矿物含量的二长花岗岩组成,具有钙碱性岩系地球化学特征^[22]。大量的野外填图表明,四海山花岗岩类侵入傲徕山花岗岩类和峰山花岗岩类。说明四海山花岗岩类是鲁西新太古代构造岩浆活动末期的产物。新太古代之后,直到晚中生代,鲁西再无大规模的岩浆活动。四海山花岗岩类与傲徕山花岗岩类和峰山花岗岩类在时间和空间上相互交叉,说明三者具有连续演化关系。地球化学特征指示,鲁西新太古代岩浆活动由奥长花岗岩系、钙碱性岩系向钾玄岩系演化^[22]。四海山花岗岩类是山东境内最早期的A型花岗岩,这种花岗岩是大陆克拉通化及地壳分异的重要事件,它的出现标志着新太古代鲁西地壳已经演化为类似于现代大陆的成熟刚性地壳,也是华北克拉通东部基底初步完成克拉通化的重要标志。

5.2.2 岚山头片麻岩与苏鲁造山带新元古代岩浆活动

前人测试的岚山头片麻岩的单锆石Pb-Pb同位素年龄为 $622.7 \pm 22.8 \text{ Ma}$ 和 $782.9 \pm 12.2 \text{ Ma}$,锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄为 $772 \pm 26 \text{ Ma}$ ^[59,60]。对与岚山头片麻岩相似的江苏东海片麻状碱性花岗岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb定年结果表明,岩石形成于 770 Ma 左右^[61]。可见,岚山头片麻岩形成于新元古代末。

新元古代花岗岩片麻岩是苏鲁造山带的主要地质组成单元,也是山东省继中-新太古代之后的又一次大规模岩浆活动。山东省区域地质工作者将其划分为三种类型:①荣成片麻岩套,以二长花岗质片麻岩为主,少量花岗闪长质片麻岩、石英二长闪长质片麻

岩和英云闪长质片麻岩,是苏鲁超高压变质带中分布最广的花岗质片麻岩,具S型花岗岩特点^[22],同位素年龄范围为 $798 \sim 772 \text{ Ma}$ ^[58];②月季山片麻岩套,以含角闪二长花岗质片麻岩为主,少量含角闪二长质片麻岩、黑云石英二长质片麻岩及花岗闪长质片麻岩,具有I型花岗岩特点^[22],同位素年龄范围为 $862 \sim 723 \text{ Ma}$ ^[58];③铁山片麻岩套(包括岚山头片麻岩),早期为碱长片麻岩类,包括中细粒正长花岗质片麻岩、中粒正长花岗质片麻岩和中粗粒正长花岗质片麻岩,晚期为碱性花岗质片麻岩类,包括中粒含霓石花岗质片麻岩、中细粒含霓石花岗质片麻岩和中粒含霓辉花岗质片麻岩,为A型花岗岩。野外调查证实,岚山头片麻岩侵入荣成和月季山片麻岩套,岚山头片麻岩为苏鲁造山带大规模岩浆活动末期的产物。岚山头片麻岩之后至三叠纪之前的整个古生代期间,鲁东地区为构造稳定阶段,没有发生新的岩浆活动。苏鲁造山带三种类型花岗质片麻岩的同位素年龄数值和区域分布相互重叠,指示他们为同一构造阶段产物,岩石成因经历了由S型、I型向A型的演化。岚山头A型花岗质片麻岩类的出现标志着强烈的拉张构造环境。

5.2.3 石岛花岗岩类与苏鲁造山带三叠纪碰撞造山作用

前人测试的石岛花岗岩类的同位素年龄为 $227 \sim 200.6 \text{ Ma}$ ^[22],形成于三叠纪末期。石岛花岗岩类侵入到苏鲁造山带的超高压变质岩中,指示其形成于超高压变质时代之后。前人对苏鲁造山带中的榴辉岩进行了很多同位素年龄测试,测试结果如 $228 \sim 221 \text{ Ma}$ (Sm-Nd法)^[62-63]、 $217.1 \pm 8.7 \text{ Ma}$ (U-Pb法)^[64]、 $228 \pm 29 \text{ Ma}$ (锆石SHRIMP法)^[65];刘福来等^[66-67]采用SHRIMP法测得超高压片麻岩中含柯石英微区的锆石及锆石边部的同位素年龄为 $242 \sim 209 \text{ Ma}$ 及 $230 \sim 202 \text{ Ma}$,认为 $242 \sim 224 \text{ Ma}$ 是超高压变质年龄, $229 \sim 202 \text{ Ma}$ 是超高压变质岩的退变质年龄。可见石岛花岗岩类的形成时代与超高压变质岩的退变质年龄或超高压变质岩的折返时代一致。前人研究认为,石岛杂岩体是与扬子和华北大块俯冲过程中板片断离作用有关的同造山(同折返)侵入岩^[30,41]及后造山侵入岩^[32]。鉴于超高压变质岩退变质阶段的变质程度为角闪岩相,因此认为,石岛花岗岩类是超高压变质岩折返到角闪岩相温压条件下,富集岩石圈地幔部分熔融并经历不同程度

结晶分异和下地壳同化混染的产物。石岛A型花岗岩的产生标志着苏鲁造山带强烈的碰撞造山和超高压变质岩构造折返过程的基本结束,也标志着山东地区由华北-扬子构造体系向欧亚-太平洋构造体系的转折。

5.2.4 崂山花岗岩类与华北克拉通破坏

前人测试的崂山花岗岩类的同位素年龄是 $121 \sim 104 \text{ Ma}^{[68-72]}$,指示其形成于早白垩世。鲁东地区侏罗-白垩纪花岗岩类侵入岩非常发育,主要包括玲珑、郭家岭、伟德山和崂山四种类型,其同位素年龄分别为 $164 \sim 140 \text{ Ma}$ 、 $130 \sim 125 \text{ Ma}$ 、 $126 \sim 108 \text{ Ma}$ 和 $121 \sim 104 \text{ Ma}^{[68-95]}$ 。玲珑型花岗岩类为二长花岗岩系列侵入岩,具壳源S型花岗岩和埃达克岩地球化学特征;郭家岭型花岗岩类为二长闪长岩-石英二长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩系列侵入岩,具壳幔混合源I型花岗岩和埃达克岩地球化学特征;伟德山花岗岩类为闪长岩-石英二长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩系列侵入岩,具壳幔混合源I型花岗岩和弧花岗岩地球化学特征^[33];崂山花岗岩类为A型花岗岩。四种花岗岩类的岩石化学成分由高钾钙碱性系列向橄榄安粗岩系列演化,微量元素由高Ba、Sr花岗岩向低Ba、Sr花岗岩演化,稀土元素由无或弱正铈异常向显著负铈异常演化,岩浆岩成因由S型向I型、A型演化^[22,33,96-97]。晚中生代岩浆活动是山东地区第三次大规模的岩浆活动,除了大量花岗岩类外,还发育较多白垩纪火山岩。崂山A型花岗岩类的出现标志着大规模岩浆活动的结束,此后山东地区再无明显的花岗岩类岩浆活动,在晚白垩世和新生代主要出现基性火山活动。

鲁东位于华北克拉通的东南边缘,侏罗-白垩纪强烈的岩浆活动是克拉通破坏的标志。华北克拉通在古元古代晚期形成后,直到早中生代保持其基本稳定的特征。晚中生代古太平洋板块俯冲以及蒙古-鄂霍次克海的闭合导致克拉通动力学体制发生重大转折,使得华北克拉通发生破坏,并在约 125 Ma 达到峰期^[98]。早白垩世伸展构造是华北克拉通破坏的重要表现,产生了广泛的变质核杂岩、拆离断层和断陷盆地等,在鲁东地区显现为胶莱盆地、玲珑变质核杂岩等^[99]。A型花岗岩形成于地壳伸展减薄构造背景下的拉张环境,是克拉通破坏的结果。崂山花岗岩类的同位素年龄接近于华北克拉通破坏的峰期时间,是克拉通破坏峰期后的重要标志。

5.3 山东省主要构造岩浆活动带及其演化

多重地球动力学背景,导致了山东省大地构造演化的复杂历程。四期A型花岗岩类成为揭示山东陆壳演化的标志性地体,其时空分布指示了山东地区三条最重要的构造岩浆活动带和四个关键的大地构造演化阶段。

5.3.1 鲁西构造岩浆活动带—新太古代成熟陆壳形成阶段

鲁西构造岩浆活动带是鲁西早前寒武纪结晶基底的最主要组成物质,与华北克拉通东部结晶基底岩系具有广泛的一致性。TTG质花岗岩是新太古代分布最为广泛的基底变质岩系,其形成和演化与太古宙构造环境的演化密切相关。一般认为,太古宙花岗岩类主要由 $T_1T_2G_1$ (G_1 -花岗闪长岩)构成,代表初始陆壳形成,古元古代开始才有大量的花岗岩类(G_1 和 G_2 , G_2 花岗岩)形成,代表成熟陆壳^[100,101]。鲁西结晶基底岩系主要由新太古代花岗岩类组成,是一条大规模的新太古代构造岩浆活动带。其新太古代早期至晚期早阶段的花岗岩均为 $T_1T_2G_1$ 组合(泰山花岗岩、新甫山花岗岩和峰山花岗岩),并且新太古代早期和中期有较多基性岩和超基性岩,至新太古代晚期的中晚阶段出现大面积的二长花岗岩组合(G_2 , 傲徕山花岗岩),新太古代末期则出现A型花岗岩(四海山花岗岩类)。这种岩浆序列特征表明,新太古代早期为初始的不成熟陆壳组成,至新太古代晚期开始向成熟陆壳转化,为半成熟陆壳组成^[21,22]。指示了从不成熟洋内岛弧向半成熟的大陆化岛弧转化,及从初始的玄武质地壳转化为半成熟的大陆化地壳的演化过程。

新太古代是华北克拉通基底东部陆块和西部陆块两个微大陆尺度的陆核构造拼合形成华北克拉通时期。该时期鲁西地区发生了强烈的造山作用,发育了大量代表活动构造环境的花岗岩类,经历了陆-陆和弧-陆碰撞阶段、碰撞后拉张阶段及碰撞后旋转等演化阶段^[21,22]。四海山花岗岩类为造山后伸展背景下壳幔相互作用形成的A型花岗岩,是新太古代鲁西地壳演化为类似于现代大陆的成熟刚性地壳的标志。

5.3.2 苏鲁构造岩浆活动带—新元古代构造裂解阶段和三叠纪大陆碰撞阶段

苏鲁造山带是一条位于扬子板块与华北板块之间的以新元古代构造岩浆活动为主叠加了三叠纪超

高压变质作用的复杂构造岩浆活动带。新元古代的花岗质片麻岩形成了较完整的花岗岩类岩浆演化序列:新元古代早期出现少量TTG花岗岩类(荣成片麻岩套的早期单元),新元古代早中期以大致同时出现S型和I型花岗岩类(荣成和月季山片麻岩套)为特征,岚山头A₁型花岗岩的出现标志着地壳处于非造山拉张环境及构造岩浆活动过程的结束。这一岩浆演化序列被认为是与Rodinia超大陆裂解事件有关的产物^[102,103]。岚山头碱性花岗质片麻岩的准确厘定,为深化认识苏鲁造山带在新元古代的构造裂解过程提供了重要岩石学证据。

苏鲁造山带中以榴辉岩为代表的超高压变质岩的存在,指示该带在中-晚三叠世经历了华北与扬子陆壳的大陆深俯冲、陆块碰撞和超高压变质岩快速折返过程。晚三叠世末石岛A型花岗岩类的出现,指示苏鲁碰撞造山带强烈碰撞造山过程已经结束,处于后造山拉张阶段^[104]。

5.3.3 鲁东构造岩浆活动带—晚中生代克拉通破坏阶段

华北与扬子板块于三叠纪拼合后,山东的胶北地块与苏鲁造山带进入了共同演化阶段,一并经历了与华北克拉通破坏有关的燕山期强烈的构造岩浆活动。华北克拉通破坏主要发生于晚中生代,表现为强烈的岩石圈减薄,构造岩浆活动非常活跃。在山东省则发育了与岩石圈减薄有关的大规模岩浆作用、大范围盆地断陷、高强度金成矿爆发、高速度地壳隆升和多式样脆性断裂切割等地质构造事件。在华北克拉通破坏的高峰期白垩纪时,山东省发育有与古太平洋板块俯冲有关的具弧后拉张性质活动大陆边缘特点的火成岩组合。其中,早白垩世岩浆活动广泛而强烈,是山东境内最为强烈的岩浆活动期,且鲁西与鲁东岩浆活动的特点有明显差异,鲁东侵入岩规模大、侵位深度深、钾质含量高。晚白垩世岩浆活动迅速减弱,仅在胶莱盆地中出现少量来源于新生亏损岩石圈地幔的碱性玄武岩。鲁东早白垩世A型花岗岩(崂山花岗岩类)规模大,早期为铝质A₂型,晚期出现强碱性的A₁型花岗岩,是华北克拉通破坏峰期后的产物,其后进入热衰减时期,出现以碱性玄武岩为代表的晚白垩世和新生代岩浆活动^[22,63]。

6 结论

山东省的四期A型花岗岩中,四海山花岗岩类为

A₂型花岗岩,岚山头花岗质片麻岩早期为A₂型花岗岩、晚期为A₁型花岗岩,石岛花岗岩类为A₂型花岗岩,崂山花岗岩类由早期A₂型和晚期A₁型花岗岩组成。

四期A花岗岩形成于不同的地质时代,它们及同期的钙碱性花岗岩类共同揭示了山东省四个大地构造阶段的关键构造演化过程。四海山花岗岩类同位素年龄为 $2\,533\pm 8\text{ Ma}$,属太古宙微陆块陆-陆或弧-陆碰撞的后造山拉张环境花岗岩类,其与相关的TTG花岗岩类共同揭示了鲁西新太古代成熟陆壳的形成过程,是山东地区和华北克拉通东部基底初步完成克拉通化的重要标志。岚山头花岗质片麻岩形成于新元古代末,为非造山拉张环境的花岗质片麻岩,其与相关的钙碱性花岗岩类共同指示了与Rodinia超大陆裂解事件有关的地壳拉张过程;石岛花岗岩类形成于晚三叠世,属扬子板块与华北板块陆-陆碰撞的后造山拉张环境花岗岩类,标志着苏鲁造山带强烈碰撞造山和超高压变质岩构造折返过程的基本结束。崂山花岗岩类形成于早白垩世晚期,为非造山拉张环境的花岗岩类,其与相关的钙碱性花岗岩共同揭示了晚中生代克拉通破坏的演化过程,是华北克拉通破坏峰期后的重要标志。

致谢:感谢中国地质调查局天津地质调查中心王惠初研究员邀请撰写此文。感谢两位匿名评审专家提供了宝贵的修改意见和建议!

参考文献:

- [1] WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407-419.
- [2] CREASER R A, PRICE R C, WORMALD R J. A-type granites revisited: Assessment of a residual source model[J]. Geology, 1991, 19(2): 163-166.
- [3] DOUCE A E P. Generation of metaluminous A-type granites by low pressure melting of calc-alkaline granitoids[J]. Geology, 1997, 25(8): 743-746.
- [4] 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 等. A型岩套的分类、判别标志和成因[J]. 高校地质学报, 2003, 9(4): 573-591.
- [5] 贾小辉, 王强, 唐功建. A型花岗岩的研究进展及意义[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(3): 465-480.
- [6] 张旗, 冉峰, 李承东. A型花岗岩的实质是什么? [J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(4): 621-626.
- [7] LOISELLE M C, WONES D R. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. Geological Society of America, Abstract Progressing, 1979, 11(2): 448-468.
- [8] EBY G N. The A-type granitoids: a review of their occur-

- rence and chemical characteristics and speculation on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 1990, 26: 115-134.
- [9] EBY G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 1992, 20: 641-644.
- [10] 许保良, 阎国翰, 张臣. A型花岗岩的岩石学亚类及其物质来源[J]. *地学前缘*, 1998, 5(3): 113-125.
- [11] WU F Y, SUN D Y, LI H M, et al. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 2002, 11: 311-323.
- [12] 吴锁平, 王梅英, 戚开静. A型花岗岩研究现状及述评[J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(1): 57-66.
- [13] SYLVESTER P J. Post-collisional alkaline granites[J]. *The Journal of Geology*, 1989, 97: 261-280.
- [14] TURNER S, SANDIFORD M, FEDEN J. Some geodynamic and compositional constraints on "postorogenic" magmatism[J]. *Geology*, 1992, 20(10): 931.
- [15] 王德滋, 赵广涛, 邱检生. 中国东部晚中生代A型花岗岩的构造制约[J]. *高校地质学报*, 1995, 1(2): 13-21.
- [16] 孙德有, 吴福元, 李惠民, 等. 小兴安岭西北部造山后A型花岗岩的时代及与索伦山-贺根山-扎赉特碰撞拼合带东延的关系[J]. *科学通报*, 2000, 45(20): 2217-2222.
- [17] 赵娇, 张成立, 郭晓俊, 等. 华北吕梁地区2.4Ga A型花岗岩的确定及地质意义[J]. *岩石学报*, 2015, 31(06): 1606-1620.
- [18] 孙德有, 吴福元, 高山, 等. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质A型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约[J]. *地学前缘*, 2005, (02): 263-275.
- [19] COLLINS W J, BEAMS S D, WHITE A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1982, 80(2): 189-200.
- [20] KING P L, WHITE A J R, CHAPPELL B W, et al. Characterization and Origin of Aluminous A-type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(3): 371-391.
- [21] 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, (03): 165-175.
- [22] 宋明春, 徐军祥, 王沛成, 等. 山东省大地构造格局和地质构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 2009, 1-237.
- [23] LI Y L, ZHANG H F, GUO J H, et al. Petrogenesis of the Huili Paleoproterozoic leucogranite in the Jiaobei Terrane of the North China Craton: A highly fractionated albite granite forced by K-feldspar fractionation[J]. *Chemical Geology*, 2017, 450: 165-182.
- [24] 宋明春, 王沛成, 梁邦启, 等. 山东省区域地质[M]. 济南: 山东省地图出版社, 2003, 25-720.
- [25] 宋明春, 韩景敏, 宫述林. 苏鲁造山带大规模岩浆活动的证据: 新元古代多成因花岗质片麻岩[J]. *矿物岩石*, 2007(02): 22-32.
- [26] 穆克敏, 林景仟, 邹祖荣, 等. 华北地台区花岗质岩石的成因[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1989, 172-225.
- [27] 谢智. 大别-苏鲁造山带岩石的锆石U-Pb年龄[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 1998, 8-14.
- [28] 林景仟, 谭东娟, 迟效国. 胶东半岛中生代花岗岩[M]. 北京: 科学出版社, 1992, 208.
- [29] 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 等. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程: 锆石U-Pb年代学[J]. *岩石学报*, 2005, 21(4): 1281-1301.
- [30] CHEN J F, XIE Z, LI H M, et al. U-Pb zircon ages for a collision-related K-rich complex at Shidao in the Sulu ultrahigh pressure terrane, China[J]. *Geochemical Journal*, 2003, 37: 35-46.
- [31] XU H, ZHANG J, WANG Y, et al. Late Triassic alkaline complex in the Sulu UHP terrane: Implications for post-collisional magmatism and subsequent fractional crystallization[J]. *Gondwana Research*, 2016, 35: 390-410.
- [32] 高天山, 陈江峰, 谢智, 等. 苏鲁超高压变质带中三叠纪岛杂岩体的地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2004, 05: 36-49.
- [33] 王斌, 宋明春, 霍光, 等. 胶东晚中生代花岗岩的源区性质与构造环境演化及其对金成矿的启示[J]. *岩石矿物学杂志*, 2021, 40(02): 288-320.
- [34] WILLIAMS I S, CLAESSEON S. Isotope evidence for the Precambrian province and Caledonian metamorphism of high grade paragneiss from the Seve Nappes Scandinavian Caledonides II Ion microprobe zircon U-Th-Pb[J]. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 1987, 97: 205-217.
- [35] 宋彪, 张玉海, 万渝生. 锆石 SHRIMP 样品制靶、年龄测定及有关现象讨论[J]. *地质论评*, 2002, 48(增刊): 26-30.
- [36] LUDWIG K R. Isoplot/Ex version 2.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [J]. *Geochronology Center Berkeley, Special Publication 1a*, 1999.
- [37] MANIAR PD, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5), 635-643.
- [38] MIDDLEMOST EAK. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 1994, 37: 215-224.
- [39] RICKWOOD P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 1989, 22: 247-263.
- [40] 赵广涛, 王德滋. 崂山花岗岩岩石地球化学与成因[J]. *高校地质学报*, 1997, 3(1): 1-15.
- [41] YANG J H, CHUNG S L, WILDE SA, et al. Petrogenesis of postorogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence[J]. *Chemical Geology*, 2005, 214, 99-125.
- [42] 陈竞志, 姜能. 胶东晚三叠世碱性岩浆作用的岩石成因—来自锆石U-Pb年龄、Hf-O同位素的证据[J]. *岩石学报*, 2011, 27(12): 3557-3574.
- [43] ZHAO Z F, ZHENG Y F, ZHANG J, et al. Syn-exhuma-

- tion magmatism during continental collision: evidence from alkaline intrusives of Triassic age in the Sulu orogen[J]. *Chemical Geology*, 2012, 328, 70–88.
- [44] XU H J, ZHANG J F, WANG Y F, et al. Late Triassic alkaline complex in the Sulu UHP terrane: Implications for post-collisional magmatism and subsequent fractional crystallization[J]. *Gondwana Research*, 2016, 35: 390–410.
- [45] COLLINS W J, BEAMS S D, WHITE A, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1982, 80(2): 189–200.
- [46] BOYNTON W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[M]. In: Henderson P (Ed.). *Rare earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 1984, 63–114.
- [47] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society of Special Publication*, London, 1989, 42(1): 313–345.
- [48] 周亚东. 青岛崂山A型花岗岩的地质地球化学特征[J]. *南京大学学报*. 1989, 03: 92–107.
- [49] PICHER W S. Granite type and tectonic environment [A]. *Mountain Building Processes*[M]. London: Academic Press, 1983: 19–40.
- [50] BEDARD J. Enclaves from the A-type granite of the Megantic Complex, White Mountain magma series: Clues to granite magma genesis [J]. *Journal of Geophysical*, 1990, 95 (B11): 17797–17819.
- [51] 陈海福, 何书跃, 张爱奎, 等. 东昆仑卡尔却卡地区中志留世A型花岗岩岩石成因及构造环境[J]. *地质通报*, 2021, 40(08): 1380–1393.
- [52] WHALEN J B, JENNER G A, LONGSTAFFE F J, et al. Geochemical and Isotopic (O, Nd, Pb and Sr) Constraints on A-type Granite Petrogenesis Based on the Topsails Igneous Suite, New foundland Appalachians[J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(6): 1463–1489.
- [53] MINGRAM B, TRUMBULL R B, LITTMAN S, et al. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: evidence for mixing of crust and mantle-derived components[J]. *Lithos*, 2000, 54(1): 1–22.
- [54] YANG J H, WU F Y, CHUNG S L, et al. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, Northeast China: Geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 2006, 89(1): 89–106.
- [55] DOUCE A E P. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids[J]. *Geology*, 1997, 25(8): 743–746.
- [56] PEARCE J A, Harris N B and Tindle AG. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25: 956–983.
- [57] 薛怀民, 刘福来, 孟繁聪. 苏鲁造山带胶东区段花岗岩片麻岩类的常量与微量元素地球化学: 扬子克拉通北缘新元古代活动大陆边缘的证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(7): 1779–1790.
- [58] 张增奇, 张成基, 王世进, 等. 山东省地层侵入岩构造单元划分对比意见[J]. *山东国土资源*, 2014, 30(03): 1–23.
- [59] 胡建, 邱检生. 山东崂山片麻状变质花岗岩的年代学与地球化学: 对原岩属性及其构造背景的启示[J]. 2009, 1–12.
- [60] 胡建, 邱检生, 徐夕生, 等. 山东崂山I型与A型复合片麻状变质花岗岩: 年代学、地球化学及其构造指示意义[J]. *岩石学报*, 2009, 25(02): 282–296.
- [61] 邱检生, 胡建, 王汝成. 江苏东海片麻状碱性花岗岩的年代学与地球化学: 对扬子板块东北缘新元古构造演化的启示[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008(z1). DOI: 10.3969/j.issn.1007–2802.2008.z1.093.
- [62] LI S G, XIAO Y, LIU D, et al. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes[J]. *Chemical Geology*, 1993, 109: 89–111.
- [63] LI S G, WANG W, CHEN Y, et al. Excess argon in phengite from eclogite: Evidence from dating of eclogite minerals by Sm–Nd, Rb–Sr and ^{39}Ar – ^{40}Ar methods[J]. *Chemical Geology*, 1994, 112: 343–350.
- [64] AMES L, ZHOU G, XIONG B. Geochronology and geochemistry of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China[J]. *Tectonics*, 1996, 15: 422–489.
- [65] 杨经绥, 许志琴, 吴才来, 等. 含柯石英锆石的 SHRIMP U–Pb 定年: 胶东印支期超高压变质作用的证据[J]. *地质学报*, 2002, 76(3): 354–372.
- [66] 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1): 9–26.
- [67] 刘福来, 许志琴, 宋彪. 苏鲁地体超高压和退变质时代的厘定: 来自片麻岩锆石微区 SHRIMP–U–Pb 定年的证据[J]. *地质学报*, 2003, 77(2): 229–237.
- [68] 赵广涛, 曹钦臣, 王德滋, 等. 崂山花岗岩锆石 U–Pb 年龄测定及其意义[J]. *青岛海洋大学学报*, 1997, (03): 116–118+120–122.
- [69] ZHAO G T, WANG D Z, CAO Q C. Thermal evolution and its significance of I–A type granitoid complex: the Laoshan granitoid as an example[J]. *Science China Earth Sciences*, 1998, 41(5): 529–536.
- [70] 周建波, 郑永飞, 赵子福. 山东五莲中生代岩浆岩的锆石 U–Pb 年龄[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(2): 185–194.
- [71] 王世进, 万渝生, 王伟, 等. 山东崂山花岗岩形成时代—锆石 SHRIMP U–Pb 定年[J]. *山东国土资源*, 2010, 26(10): 1–6.
- [72] 高雅洁. 中国东部中生代板内花岗岩成因及构造意义[D]. 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2019.
- [73] 胡世玲, 王松山, 桑海清, 等. 山东玲珑和郭家岭岩体的同位素年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 1987, 20(3): 38–42.
- [74] 徐洪林, 张德全, 孙桂英. 胶东崂山花岗岩的特征、

- 成因及其与金矿的关系[J]. 岩石矿物学杂志, 1997, 16(2): 131-143.
- [75] 关康, 罗镇宽, 苗来成, 等. 胶东招掖郭家岭型花岗岩锆石 SHRIMP 年代学研究[J]. 地质科学, 1998, 33(3): 318-328.
- [76] 苗来成, 罗镇宽, 关康, 等. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱 U-Pb 年龄及其岩石学意义[J]. 岩石学报, 1998, 14(2): 198-206.
- [77] WANG L G, QIU Y M, MC NAUGHTON N J, et al. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northeastern Jiaodong peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids[J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13: 275-291.
- [78] ZHANG L C, SHEN Y C, LIU T B, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Rb-Sr isochron dating of the gold deposits on northern margin of the Jiaolai Basin, Shandong, China[J]. Science China: Earth Science, 2003, 46(7): 708-718.
- [79] ZHANG X O, CAWOOD P A, WILDE S A, et al. Geology and timing of mineralization at the Cangshang gold deposit, north-western Jiaodong Peninsula, China[J]. Mineralium Deposita, 2003, 38(2): 141-153.
- [80] HU F F, FAN H R, YANG J H, et al. Mineralizing age of the Rushan lode gold deposit in the Jiaodong Peninsula: SHRIMP U-Pb dating on hydrothermal zircon[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(15): 1629-1636.
- [81] 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 等. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学[J]. 岩石学报, 2005, 21(4): 1281-1301.
- [82] 李俊建, 罗镇宽, 刘晓阳, 等. 胶东中生代花岗岩及大型-超大型金矿床形成的地球动力学环境[J]. 矿床地质, 2005, 24(4): 361-372.
- [83] 邱连贵, 任凤楼, 曹忠祥, 等. 胶东地区晚中生代岩浆活动及对大地构造的制约[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(1): 117-123.
- [84] 谭俊, 魏俊浩, 郭玲利, 等. 胶东郭城地区脉岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及斑晶 EPMA 研究: 对岩石圈演化的启示[J]. 中国科学(D辑), 2008, 38(8): 913-929.
- [85] 张田, 张岳桥. 胶北隆起晚中生代构造-岩浆演化历史[J]. 地质学报, 2008, 82(9): 1210-1228.
- [86] GOSS C S, WILDE S A, WU F Y, et al. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton[J]. Lithos, 2010, 120(3-4): 309-326.
- [87] ZHANG J, ZHAO Z F, ZHENG Y F, et al. Postcollisional magmatism: Geochemical constraints on the petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Sulu orogen, China[J]. Lithos, 2010, 119(3-4): 512-536.
- [88] YANG K F, FAN H R, SANTOSH M. Reactivation of the Archean Lower Crust: Implications for Zircon Geochronology, Elemental and Sr-Nd-Hf Isotopic Geochemistry of Late Mesozoic Granitoids from Northwestern Jiaodong Terrane, the North China Craton[J]. Lithos, 2012, 146-147: 112-127.
- [89] 王世进, 万渝生, 郭瑞朋, 等. 鲁东地区玲珑型(超单元)花岗岩的锆石 SHRIMP 定年[J]. 山东国土资源, 2011, 27(4): 1-7.
- [90] 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.
- [91] MA L, JIANG S Y, DAI B Z, et al. Multiple sources for the origin of Late Jurassic Linglong adakitic granite in the Shandong Peninsula, Eastern China: Zircon U-Pb geochronological, Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. Lithos, 2013, 162-163(Complete): 251-263.
- [92] MA L, JIANG S Y, HOU M L, et al. Geochemistry of Early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: Implication for lithospheric evolution of the eastern North China Craton[J]. Gondwana Research, 2014, 25(2): 859-872.
- [93] 罗贤冬, 杨晓勇, 段留安, 等. 胶北地块与金成矿有关的郭家岭岩体和上庄岩体年代学及地球化学研究[J]. 地质学报, 2014, 88(10): 1874-1888.
- [94] 董学, 李大鹏, 赵睿, 等. 胶东泽头岩体锆石 U-Pb 年代学和岩石成因: 对区域早白垩世晚期成岩成矿作用的指示[J]. 岩石学报, 2020, 36(05): 1501-1514.
- [95] 宋英昕, 于学峰, 李大鹏, 等. 胶东西北部北截岩体岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学与 Sr-Nd-Pb 同位素制约[J]. 岩石学报, 2020, 36(5): 1477-1500.
- [96] 闫峻, 陈江峰, 谢智, 等. 鲁东晚白垩世玄武岩中的幔源捕虏体: 对中国东部岩石圈减薄时间制约的新证据[J]. 科学通报, 2003, 48(14): 1570-1574.
- [97] 刘建明, 张宏福, 孙景贵, 等. 山东幔源岩浆岩的碳-氧和铈-钕同位素地球化学研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 10: 921-930.
- [98] 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(05): 583-592.
- [99] 宋明春, 李杰, 李世勇, 等. 鲁东晚中生代热隆—伸展构造及其动力学背景[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(04): 941-964.
- [100] BAKER F. Trondhjemites, dacites and related rocks[M]. New York. Elsevier Science Publishing Company. pp. 1979, 321.
- [101] 张家辉, 王惠初, 郭敬辉, 等. 华北克拉通怀安杂岩中 ~2.03 Ga 变质石榴花岗岩的成因其对古元古代裂谷事件的制约[J]. 地质调查与研究, 2020, 43(02): 114-126.
- [102] 许志琴, 刘福来, 戚学祥, 等. 南苏鲁超高压变质地体中罗迪尼亚超大陆裂解事件的记录[J]. 岩石学报, 2006, 22(7): 1745-1760.
- [103] 徐焱, 张世红. 塔里木克拉通在 Rodinia 中的位置—研究进展与问题[J]. 地质调查与研究, 2020, 43(02): 169-176.
- [104] 初航, 张晋瑞, 魏春景, 等. 华北北部古生代—中生代多期变质作用及其大地构造意义——“华北地区古生代变质作用和动力学”研究进展与展望[J]. 地质调查与研究, 2020, 43(02): 186-197.