

崂山早白垩世高分异I型花岗岩地球化学特征及 岩石成因机制

杜娟^{1,2}, 于胜尧^{1,2}, 高翔宇³, 蒋兴洲¹, 彭银彪¹, 纪文涛¹, 李传志¹

(1. 中国海洋大学 海洋高等研究院, 海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 山东理工大学 资源与
环境工程学院, 山东 淄博 255022)

摘要: 崂山花岗岩出露于胶东区域, 目前对其花岗岩的类型划分、源区、成因仍存在争议, 而对高分异花岗岩成因、演化过程尚缺乏研究。本文以崂山早白垩世花岗岩为研究对象, 对其进行岩石学与岩相学、全岩主微量及稀土元素、锆石 U-Pb 定年与 Lu-Hf 同位素分析、电子探针长石成分分析。LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明, 崂山石英二长岩、二长花岗岩、正长花岗岩、花岗斑岩成岩年龄分别为 128.6 ± 2.7 Ma、 122.8 ± 2.5 Ma、 118.6 ± 1.2 Ma、 121.5 ± 2.7 Ma、 121.3 ± 1.2 Ma 和 114.5 ± 1.2 Ma, 指示它们均为早白垩世岩浆活动产物。地球化学组成上表现为高硅富碱, 不同程度的贫铝、镁、铁, 富集轻稀土元素和 Rb、Th、U, 亏损 Ba、Sr, 显著 Eu 负异常。崂山花岗岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-21.0 \sim -15.1$ 之间, Hf 同位素二阶段模式年龄 t_{DM2} 介于 $2482 \sim 2149$ Ma 之间。结合矿物学、岩石学和地球化学证据, 石英二长岩、二长花岗岩为 I 型花岗岩, 正长花岗岩、花岗斑岩为高分异 I 型花岗岩。结合胶东区域研究资料, 认为崂山早白垩世高分异 I 型花岗岩是在古太平洋板块俯冲作用产生的伸展构造环境下, 软流圈地幔来源的岩浆底侵, 诱发下地壳物质部分熔融形成英质岩浆, 后期受到斜长石、钾长石、磷灰石等矿物分离结晶作用的控制, 经历高分度的分异形成。

关键词: 胶东地区; 高分异 I 型花岗岩; 岩石成因; 岩浆分异; 古太平洋俯冲

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)04-0821-26

Geochemical characteristics and petrogenetic mechanism of Early Cretaceous highly fractionated I-type granites in Laoshan

DU Juan¹, YU Sheng-yao^{1,2}, GAO Xiang-yu³, JIANG Xing-zhou¹, PENG Yin-biao¹, JI Wen-tao¹
and LI Chuan-zhi¹

(1. MOE Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Technique, Institute for Advanced Ocean Study, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255022, China)

Abstract: Laoshan granites are widely distributed in Jiaodong area. Their typology, magma source and petrogenesis

收稿日期: 2023-10-01; 接受日期: 2024-01-17; 编辑: 雷敏

基金项目: 国家自然科学基金委创新群体项目(42121005); 111 项目(B20048); 泰山学者项目(Notstp20221112)

作者简介: 杜娟(1999-), 女, 研究生, 地球化学、岩石学研究方向, E-mail: 1902905681@qq.com; 通讯作者: 于胜尧(1981-), 男, 教授, 主要从事大地构造和岩石学研究, E-mail: yushengyao@ouc.edu.cn; 高翔宇(1993-), 男, 讲师, 主要从事大地构造和岩石学研究, E-mail: gaoxy@sdut.edu.cn。

网络首发时间: 2024-01-31; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240130.1935.004.html>

are still controversial, and the magmatic evolution and petrogenesis of highly fractionated I-type granite have not been well constrained. In this study, the Laoshan Early Cretaceous granites are selected as the research theme. The granites are analyzed by petrology and petrography, whole rock major and trace elements, zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotopes, plagioclase electron probe analysis. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating results show that the diagenetic ages of quartz monzonite, monzogranite, syenogranite and granitic porphyry in Laoshan are 128.6 ± 2.7 Ma, 122.8 ± 2.5 Ma $\sim$ 118.6 ± 1.2 Ma, 121.5 ± 2.7 Ma $\sim$ 121.3 ± 1.2 Ma and 114.5 ± 1.2 Ma, respectively, indicating that they were all emplaced during the Early Cretaceous. The geochemical composition of Laoshan granites show high contents of silicon and alkali, low abundances of aluminum, magnesium and iron. They are also depleted in Rb, Th, U, Ba and Sr, with significant negative Eu anomaly. The zircons $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of Laoshan granites range from -21.0 to -15.1 , and Hf isotope second-stage model ages (t_{DM2}) range from 2 482 to 2 149 Ma. Based on mineralogical, petrological and geochemical evidence, the quartz monzonite and monzogranite are I-type granites, and the syenogranite and granitic porphyry are classified as high fractionated I-type granites. Combined with the previous researches results in Jiaodong area, in the extensional tectonic setting generated by the subduction of the Paleo-pacific plate, magmas from the asthenosphere underplated into the lower crust, inducing partial melting of the lower crust material to form felsic magmas. After different degrees of fractional crystallization and evolution of felsic magmas, granites with varying degrees of differentiation in Laoshan area are formed ultimately.

Key words: Jiaodong area; highly fractionated I-type granites; petrogenesis; magmatic differentiation; paleo-pacific subduction

Fund support: Science Fund for Creative Research Groups of the Nation Natural Science Foundation of China (42121005); 111 Project (B20048); Taishan Scholar Project (Notstp20221112)

花岗岩是大陆地壳的重要组成部分之一,其成因研究对于揭示大陆地壳的形成与演化具有重要意义(翟明国, 2017)。晚中生代,华北克拉通东部发生了大面积构造热事件,产生了大规模的钙碱性和碱性岩浆岩(Menzies *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1998; Zheng *et al.*, 2001)。早白垩世被认为是古太平洋板块俯冲引发华北岩石圈减薄与克拉通破坏的高峰期(Wu *et al.*, 2005a; Zhao and Zheng, 2009; Zheng, 2009),该期岩浆岩在胶东地区分布最广泛,崂山花岗岩体是其典型代表之一(Goss *et al.*, 2010; Yan and Shi, 2014; Gao *et al.*, 2019)。前人对崂山花岗岩展开过系列研究,对崂山花岗岩的研究多集中在成岩年代学、I-A 型花岗岩类型划分及其成因模式(赵广涛等, 1997, 1998; Yan and Shi, 2014)。目前,对于崂山花岗岩形成时代已基本达成共识,其成岩年龄主要介于 125 ~ 110 Ma(赵广涛等, 1997, 1998; 王世进等, 2010; Goss *et al.*, 2010; Yan and Shi, 2014),但是对于花岗岩成因分类划分及其成因模式仍存在争议(Gao *et al.*, 2019)。

前人研究中多将崂山花岗岩划分为 I-A 型复合花岗岩体(赵广涛等, 1997, 1998),但是对于崂山花岗岩体是否存在高分异花岗岩却鲜有讨论。此外,

对于崂山花岗岩的成因模式亦存在以下不同观点: ① 熔融出 I 型花岗岩的残余下地壳部分熔融(赵广涛等, 1997, 1998); ② 下地壳中酸性物质在麻粒岩相条件下发生部分熔融(Wei, 2008); ③ 软流圈地幔来源的玄武质熔体与下地壳熔体的岩浆混合作用(Yan and Shi, 2014); ④ 岩石圈幔源熔体与下地壳熔体的岩浆混合(Goss *et al.*, 2010; Gao *et al.*, 2019)。基于上述研究现状与问题,本文在前人研究基础上,对崂山花岗岩进行野外地质、岩石学和岩相学、岩石地球化学、电子探针原位分析、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素研究,并结合前人发表的年代学和地球化学数据,精细厘定崂山花岗岩的类型与成因机制,为胶东早白垩世高分异花岗岩的存在及岩浆分异过程提供证据。

1 区域地质背景

华北克拉通是最古老的克拉通之一,地壳岩石的年龄可达 3.8 Ga(Goss *et al.*, 2010)。华北克拉通西以祁连造山带为界,东临苏鲁超高压变质带,南、北分别临中央造山带与中亚造山带(图 1a)。基于构造和变质演化研究,前人将华北克拉通划分为

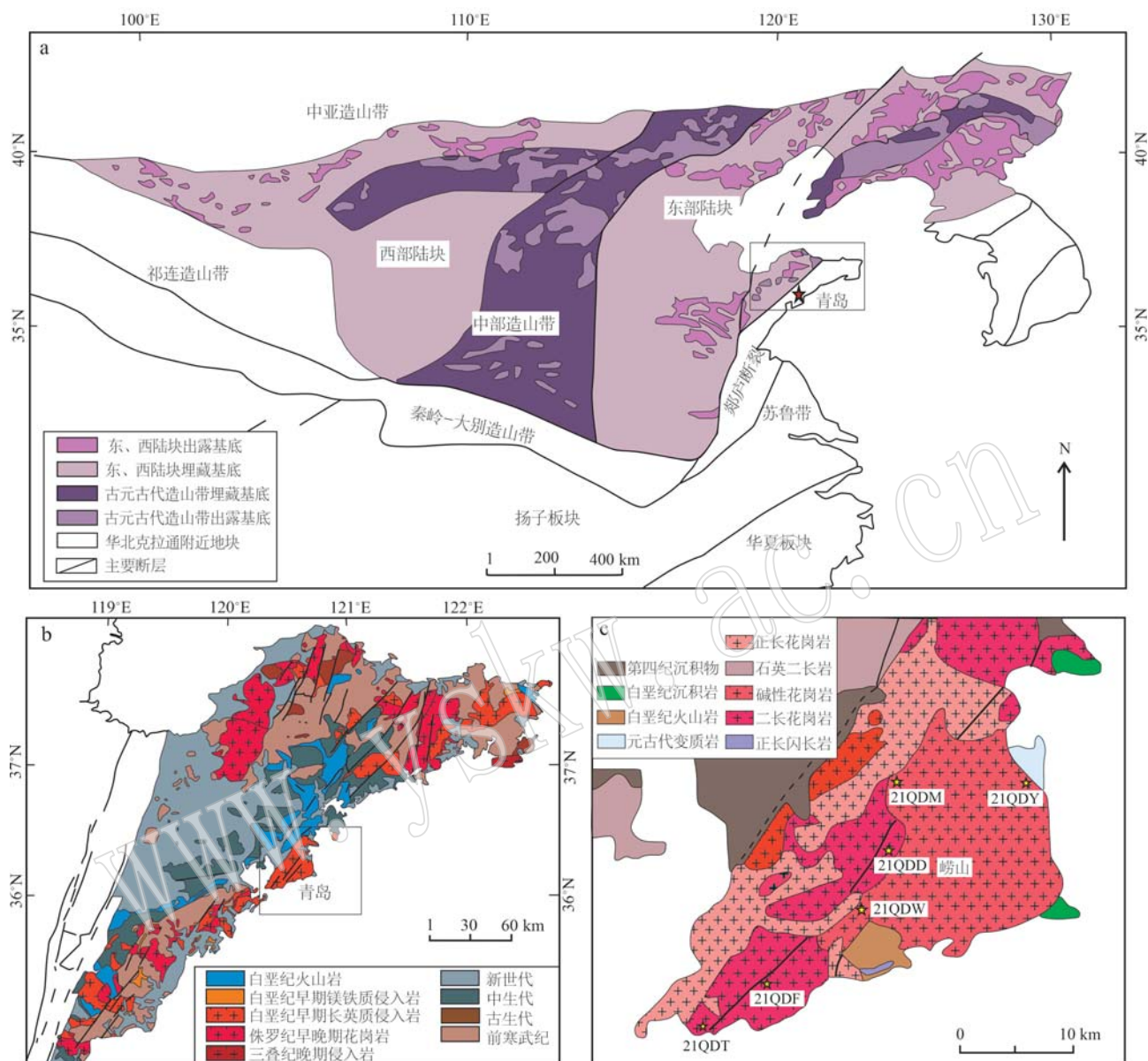


图1 华北克拉通构造分区及基底岩石分布的简化地质图(a, 据 Goss *et al.*, 2010)、山东半岛郯庐断裂以东中生代岩浆岩分布(b, 据 Gao *et al.*, 2019)和崂山花岗岩杂岩体地质图及采样位置(c, 据 Yan and Shi, 2014)

Fig. 1 Simplified geological map showing the tectonic subdivision of the North China Craton, with distribution of the basement rocks (a, after Goss *et al.*, 2010), distribution of the Mesozoic intrusive and eruptive rocks in the Jiaodong Peninsula (b, after Gao *et al.*, 2019) and geological map of the Laoshan granitic complex and sample locations (c, after Yan and Shi, 2014)

三个构造单元: 东部陆块、西部陆块、中部造山带 (Zhao *et al.*, 2001, 2005)。胶东半岛位于华北板块东南缘与扬子板块东北缘的结合部位、太平洋板块西缘和苏鲁超高压变质带北部, 由苏鲁超高压变质带、胶北地体和胶莱盆地组成 (图 1b) (Jahn *et al.*, 1996)。胶东地区主要为太古宇胶东群、古元古界荆山群和粉子山群及新元古界蓬莱群 (王立功等, 2022)。中生代, 该区受到古太平洋板块俯冲影响,

发生了广泛的构造热事件, 主要包括晚三叠世 (225 ~ 205 Ma)、晚侏罗世 (160 ~ 150 Ma) 和早白垩世 (130 ~ 110 Ma) 三期岩浆作用, 形成了大面积的花岗岩 (郭敬辉等, 2005; Yang *et al.*, 2005a, 2005b; Goss *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2017; 王斌等, 2021)。胶东地区以早白垩世岩浆岩出露的岩石种类最多, 主要包括郭家岭型花岗岩、伟德山型 (艾山型) 花岗岩和崂山型花岗岩 (徐洪林等, 1997; 王栋

等, 2023)。

本文的研究对象为崂山型花岗岩, 以青岛崂山岩体出露规模最大, 且最具代表性。崂山岩体出露在胶东半岛东南部, 隶属于胶北地体东北部和胶莱盆地中南部(陶有兵等, 2021), 岩体出露面积约为 600 km²(图 1c)。前人研究普遍认为崂山花岗岩形成于早白垩世, 侵入至白垩系莱阳群沉积岩和前寒武纪胶南群变质岩之中, 岩性以碱性花岗岩、正长花岗岩、二长花岗岩为主(赵广涛等, 1997, 1998)。

2 岩相学特征

在崂山花岗岩岩体出露区选择六个典型采样位置(图 1c), 岩性主要为正长花岗岩、花岗斑岩、二长花岗岩和石英二长岩。样品包含: ① 太平角石英二

长岩(21QDT), 岩石呈浅红色, 块状构造, 中粗粒(似斑状)结构。主要矿物包括钾长石(30%~35%)、斜长石(35%~40%)、石英(15%~20%), 含少量黑云母及锆石、榍石等副矿物。石英呈半自形粒状, 粒度大多在 1~5 mm 之间; 长石呈现弱高岭土化, 斜长石发育聚片双晶(图 2a、2b); ② 浮山和大崂樱桃谷二长花岗岩(21QDF、21QDD), 岩石呈肉红色, 粗粒花岗岩结构, 块状构造。矿物组成包括钾长石(35%~40%)、斜长石(30%~35%)、石英(20%~23%)、黑云母(2%~5%), 副矿物有 Ti-Fe 氧化物等不透明矿物、白云母。石英呈半自形粒状, 粒度大多在 1 mm 左右; 钾长石多为条纹长石和微斜长石; 斜长石呈现半自形板状; 长石呈现强高岭土化, 黑云母多已蚀变为绿泥石(图 2c、2d); ③ 毛公山花岗斑岩(21QDM), 岩石呈肉红色, 呈斑状结构, 块状构造。

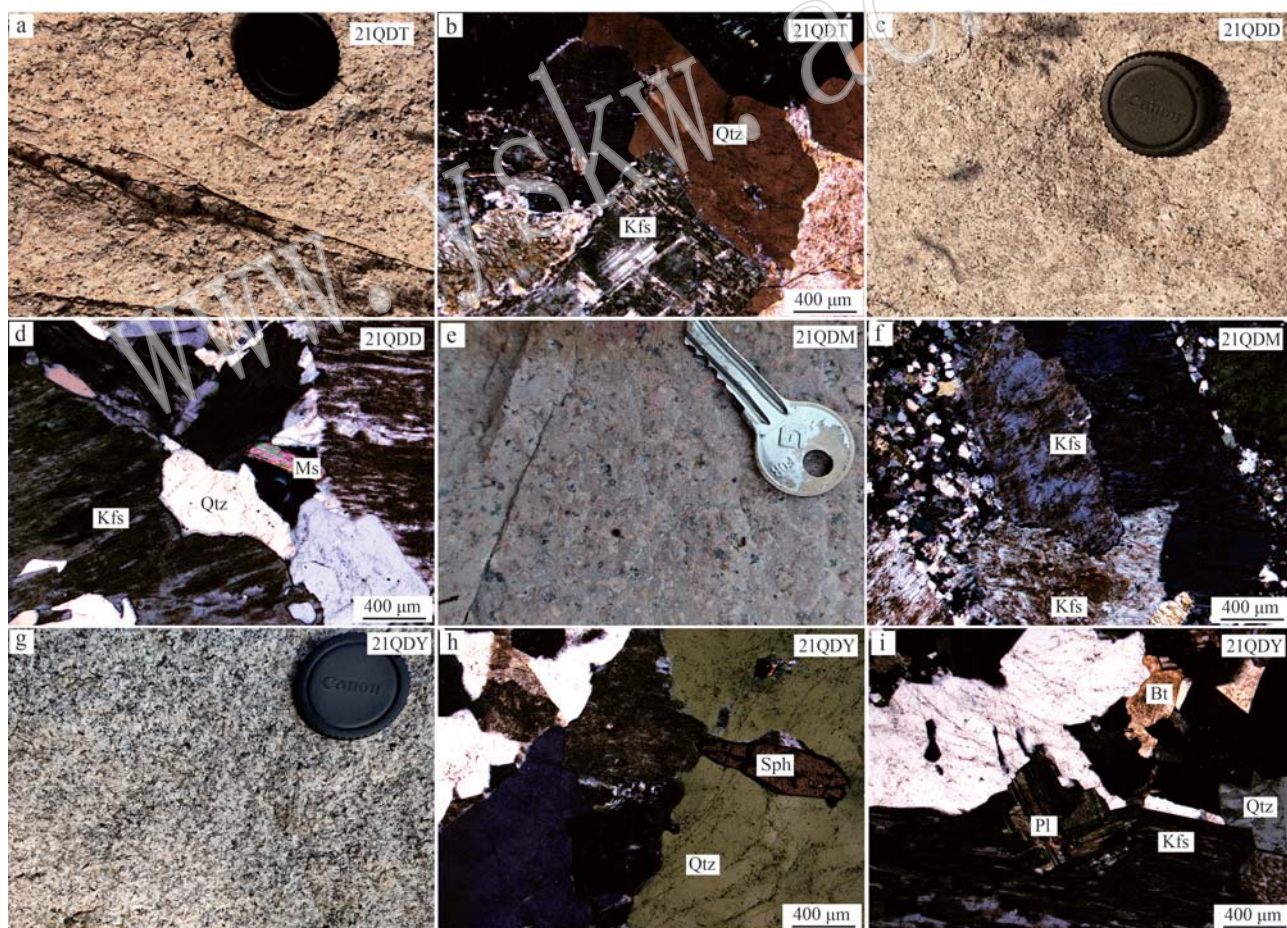


图 2 野外及薄片正交偏光显微照片

Fig. 2 Photographs in the field and photomicrographs in cross-polarized light of Laoshan granites

a, b—石英二长岩(21QDT); c, d—二长花岗岩(21QDF); e, f—花岗斑岩(21QDM); g, h, i—正长花岗岩(21QDW); Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Qtz—石英; Bt—黑云母; Ms—白云母; Sph—榍石(矿物缩写据 Kretz, 1983)
a, b—quartz-monzonite (21QDT); c, d—monzogranite (21QDF); e, f—granite porphyry (21QDM); g, h, i—syenogranite (21QDW); Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Qtz—quartz; Bt—biotite; Ms—muscovite; Sph—sphene (mineral abbreviations are after Kretz, 1983)

斑晶含量约为15%,主要矿物组成包括钾长石(55%~60%)、石英(20%~25%)、黑云母(3%~5%)。钾长石斑晶呈自形晶,基质为半自形粒状,与石英交生呈现文象结构,普遍发育高岭土化(图2e、2f);④五子顶、仰口正长花岗岩(21QDW、21QDY),岩石呈浅红色和灰白色,呈细粒—中粗粒花岗结构,块状构造。主要矿物组成包括钾长石(40%~45%)、斜长石(10%~13%)、石英(30%~35%),少量黑云母,副矿物含磁铁矿、磷灰石。石英,半自形粒状,粒度大多在1~3 mm。钾长石主要为条纹长石,条纹呈细密条带状,半自形—他形粒状,斜长石呈现半自形板状,具有高岭土化(图2g、2h、2i)。

3 分析方法

3.1 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代分析

选取6个花岗岩样品进行粉碎、锆石挑选与制靶、阴极发光(CL)图像采集和锆石U-Pb同位素测试分析工作。在河北廊坊区域地质调查研究所,运用常规的重力和磁选方法分选出锆石,在双目显微镜下进行人工挑选,将其嵌入环氧树脂中后进行制靶,抛光到暴露出锆石的中心面,在扫描电子显微镜下采集锆石的阴极发光(CL)图像。在中国地质科学院矿产资源研究所,利用激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)对锆石进行U-Pb年代学进行分析,激光束斑直径为32 μm ,以He为载气,详细的分析步骤可见侯可军等(2009)。LA-MC-ICP-MS激光剥蚀采用单点剥蚀的方式,数据分析前用锆石GJ-1进行调试仪器,使之达到最优状态,锆石U-Pb定年以锆石GJ-1为外标。测试过程中在每测定10个样品前后重复测定2个锆石GJ-1对样品进行校正,观察仪器的状态以保证测试的精确度。锆石年龄谱和图用Isoplot 3.0程序获得。

3.2 锆石 Lu-Hf 同位素

样品锆石Lu-Hf同位素分析是在中国地质科学院矿产资源研究所完成,其测试仪器为New wave UP213激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)和Neptune多接收等离子质谱仪。实验过程中以He作为剥蚀物质载气,剥蚀直径为44 μm 。Lu-Hf测点位置与U-Pb年龄测点位置一致,在分析中,以锆石国际标样GJ-1作为参考,详细分析流程见侯可军等(2007)。分析过程中锆石标准GJ-1的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值 $0.282\,004\pm 8\,(2\sigma)$,在误差范围内(Elhlou

et al., 2006)。 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 计算采用衰变常数 $\lambda = 1.865 \times 10^{-11} \cdot \text{a}^{-1}$ (Schleier *et al.*, 2001), $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.033\,2$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.282\,772$ (Blichert-Toft *et al.*, 1997),亏损地幔模式年龄(t_{DM1})计算采用 $(^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\,4$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283\,25$,二阶段Hf模式年龄(t_{DM2})计算时平均地壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.015(Griffin *et al.*, 2002)。

3.3 全岩地球化学分析

将挑选出的新鲜样品粉碎至200目以上进行全岩地球化学分析,其测试均在中国地质科学院国家地质实验测试中心进行。主量元素测试首先精准称量约0.4 g的样品粉末,放入实验坩埚中,在高温炉中用助溶剂将样品粉末烧制成饼,运用XRF法测定岩石样品中主量元素,对于>1%含量的元素分析精确度为1%~3%,<1%含量的元素,分析精确度为 $\pm 10\%$ 。将烧制好的玻璃饼敲取约40 mg测定微量元素,置入Beaker容器,加入约5:6的硝酸与氢氟酸加热溶解玻璃碎块,后蒸干剩余的酸,加入内标,置入定容瓶,加以2%的硝酸稀释样品至1 500倍,混合后转移至试管中进行上机测试。利用ICP-MS进行测试,仪器型号为AXIOSmAX。使用阳离子交换技术分离稀土元素,对于 $>10 \times 10^{-6}$ 的元素分析误差在5%以内,对于 $<10 \times 10^{-6}$ 的元素,分析误差在10%以内。

3.4 电子探针分析

选取5个花岗岩样品,对其中的斜长石及碱性长石进行电子探针分析。相关测试在中国海洋大学电子探针分析室完成,仪器型号为JEOL公司的JXA-8230型电子探针(EPMA)。分析前在显微镜下选定样品探针片中的靶向矿物并标记。样品在上机测试前镀上厚度为20 nm的碳膜以增强导电性,主要进行矿物背散射图像(BSE)与二次电子图像(SE)形态学研究和主量元素定量分析。测试工作条件为:加速电压为15 kV,探针电流为20 nA,电子束直径为5 μm (针对斜长石)与10 μm (针对碱性长石)。测试结果采用ZAF法校正。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

对采集的石英二长岩、二长花岗岩、正长花岗岩、花岗斑岩进行锆石U-Pb定年。阴极发光图像显示锆石多为半自形—自形棱柱状,半透明—透明,长40~200 μm ,宽30~100 μm ,长宽比为1:1~2:1,具

有典型的振荡环带,为岩浆锆石(图3)。锆石 U-Pb 分析测试结果见表1。石英二长岩(21QDT)锆石加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 128.6 ± 2.7 Ma ($n=16$, MSWD=0.82), Th/U 值为 $0.78 \sim 2.02$; 二长花岗岩(21QDF 和 21QDD)锆石加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 122.8 ± 2.5 Ma ($n=27$, MSWD=0.46) 和 118.6 ± 1.2 Ma ($n=30$, MSWD=0.54), Th/U 值分别为

$1.37 \sim 2.94$ 和 $1.24 \sim 3.71$; 正长花岗岩(21QDW 和 21QDY)锆石加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 121.5 ± 2.7 Ma ($n=11$, MSWD=0.81) 和 121.3 ± 1.2 Ma ($n=24$, MSWD=0.37), Th/U 值分别为 $1.45 \sim 3.73$ 和 $1.39 \sim 3.66$; 花岗斑岩(21QDM)锆石加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 114.5 ± 1.2 Ma ($n=24$, MSWD=0.74), Th/U 值为 $0.89 \sim 1.92$ 。

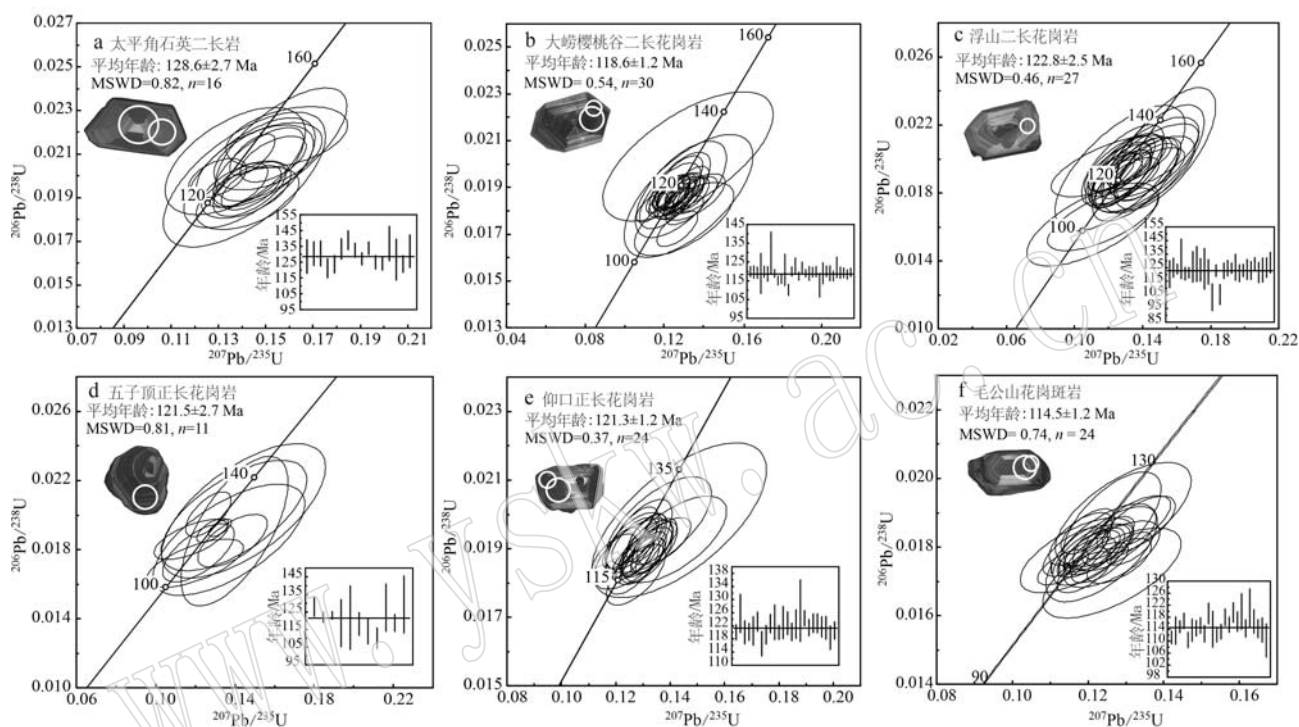


图3 崂山花岗岩的锆石 U-Pb 年龄谐和图和代表性的锆石 CL 图

Fig. 3 The concordia diagrams showing zircon U-Pb ages and representative CL images of zircons

圆圈代表 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素分析点的位置

the U-Pb age and Lu-Hf isotope analytical spots are indicated with circles, respectively

4.2 锆石 Lu-Hf 同位素

对石英二长岩(21QDT)、二长花岗岩(21QDD)、正长花岗岩(21QDY)、花岗斑岩(21QDM)进行了锆石 Lu-Hf 同位素分析,测试点位置与 U-Pb 年龄测试位置基本一致。锆石 Lu-Hf 同位素实验分析数据等见表2。分析结果如下:样品 $^{177}\text{Hf}/^{176}\text{Hf}$ 值介于 $0.282\,111 \sim 0.282\,257$ 之间;

石英二长岩 $\varepsilon\text{Hf}(t) = -19.5 \sim -16.8$, $t_{\text{DM2}} = 2\,402 \sim 2\,232$ Ma; 二长花岗岩 $\varepsilon\text{Hf}(t) = -22.4 \sim -18.3$, $t_{\text{DM2}} = 2\,421 \sim 2\,168$ Ma; 正长花岗岩 $\varepsilon\text{Hf}(t) = -20.0 \sim -15.1$, $t_{\text{DM2}} = 2\,430 \sim 2\,149$ Ma; 花岗斑岩 $\varepsilon\text{Hf}(t) = -16.7 \sim -21.0$, $t_{\text{DM2}} = 2\,482 \sim 2\,217$ Ma (图4)。

4.3 长石电子探针

选用石英二长岩(21QDT)、二长花岗岩(21QDF、21QDD)、正长花岗岩(21QDY、21QDW)进行电子探针长石成分分析,分析结果见表3。对上述样品的斜长石、钾长石进行 An-Ab-Or 投点(图5a),斜长石端员主要为钠长石-更长石,钾长石端员为正长石。石英二长岩的斜长石成分变化范围为 $\text{Ab}_{94.1} \sim \text{Or}_{9.6}$, 钾长石 $\text{Or}_{92.0} \sim \text{Or}_{98.0}$; 二长花岗岩斜长石成分范围为 $\text{Ab}_{83.9} \sim \text{Or}_{97.0}$, 钾长石 $\text{Or}_{90.8} \sim \text{Or}_{98.3}$; 正长花岗岩斜长石成分范围为 $\text{Ab}_{86.1} \sim \text{Or}_{99.4}$, 钾长石 $\text{Or}_{89.1} \sim \text{Or}_{98.5}$ 。

4.4 全岩地球化学特征

4.4.1 全岩主量元素

分析结果如表4所示。样品具有中等偏高的

表1 崂山花岗岩锆石 U-Pb 年龄数据
Table 1 Zircon U-Pb isotopic data of the Laoshan granite

测定点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ
太平角石英二长岩(样品点经纬度坐标: N36°3'45.14", E120°22'3.6")														
21QDT-TW1-1	15	102	69	1.47	0.050 7	0.004 5	0.143 1	0.018 3	0.020 1	0.001 7	136	16	129	11
21QDT-TW1-2	18	146	72	2.02	0.054 3	0.004 3	0.146 9	0.012 7	0.020 4	0.001 2	139	11	130	8
21QDT-TW1-3	10	76	47	1.6	0.053 5	0.005 0	0.145 4	0.016 4	0.020 4	0.001 2	138	15	130	8
21QDT-TW1-4	36	241	200	1.21	0.054 3	0.005 1	0.142 3	0.014 4	0.019 0	0.000 9	135	13	121	6
21QDT-TW1-5	28	228	157	1.45	0.052 4	0.003 6	0.141 7	0.012 5	0.019 4	0.000 9	135	11	124	5
21QDT-TW1-6	17	93	98	0.94	0.053 2	0.005 1	0.150 9	0.015 1	0.020 9	0.001 0	143	13	133	6
21QDT-TW1-7	18	125	92	1.36	0.053 5	0.005 0	0.158 9	0.017 0	0.021 8	0.000 9	150	15	139	6
21QDT-TW1-8	27	217	120	1.81	0.054 4	0.002 9	0.153 1	0.009 2	0.020 8	0.000 7	145	8	133	4
21QDT-TW1-9	20	159	118	1.35	0.047 2	0.002 8	0.129 6	0.008 1	0.019 9	0.000 6	124	7	127	4
21QDT-TW1-10	33	221	284	0.78	0.050 6	0.001 7	0.144 3	0.006 3	0.021 0	0.000 6	137	6	134	4
21QDT-TW1-11	33	269	159	1.7	0.052 0	0.002 4	0.139 3	0.007 7	0.019 6	0.000 7	132	7	125	4
21QDT-TW1-12	21	160	145	1.1	0.054 7	0.002 8	0.143 9	0.008 4	0.019 5	0.000 7	137	7	124	4
21QDT-TW1-13	20	148	125	1.18	0.056 6	0.006 0	0.156 6	0.018 3	0.021 4	0.001 7	148	16	137	11
21QDT-TW1-14	18	140	94	1.49	0.062 6	0.012 6	0.141 0	0.022 6	0.019 8	0.002 0	134	20	127	13
21QDT-TW1-15	18	139	103	1.35	0.055 1	0.003 7	0.143 1	0.010 2	0.019 4	0.000 8	136	9	124	5
21QDT-TW1-16	9	73	44	1.66	0.051 2	0.005 5	0.137 1	0.019 6	0.020 7	0.001 6	130	18	132	10
浮山二长花岗岩(样品点经纬度坐标: N36°5'51.84", E120°25'54.21")														
21QDF-TW-1	17	150	75	2.01	0.057 5	0.006 1	0.135 9	0.016 6	0.018 8	0.001 6	120	6	120	3
21QDF-TW-2	32	268	128	2.1	0.048 7	0.004 5	0.126 6	0.013 6	0.019 6	0.001 2	122	7	120	4
21QDF-TW-3	50	406	152	2.68	0.051 0	0.002 8	0.132 8	0.008 2	0.019 4	0.000 6	125	6	119	3
21QDF-TW-4	13	120	66	1.81	0.062 9	0.006 6	0.153 1	0.019 7	0.020 6	0.002 4	126	19	119	11
五子顶正长花岗岩(样品点经纬度坐标: N36°9'41.56", E120°30'4.22")														
21QDW-TW-1	43	338	108	3.13	0.047 0	0.002 4	0.126 6	0.007 6	0.020 0	0.000 9	121	7	128	5
21QDW-TW-2	93	781	256	3.05	0.049 0	0.001 7	0.128 6	0.005 3	0.019 1	0.000 5	123	5	122	3
21QDW-TW-3	213	1 740	772	2.25	0.049 8	0.001 2	0.132 4	0.003 8	0.019 3	0.000 3	126	3	123	2
21QDW-TW-4	21	213	78	2.74	0.056 9	0.010 7	0.137 0	0.025 2	0.018 6	0.002 1	130	23	119	13
21QDW-TW-5	15	111	64	1.73	0.056 4	0.005 7	0.139 7	0.017 8	0.019 1	0.002 9	133	16	122	18
21QDW-TW-6	47	367	167	2.2	0.056 2	0.004 6	0.138 8	0.011 6	0.018 5	0.001 0	132	10	118	6
21QDW-TW-7	38	380	102	3.73	0.051 2	0.005 1	0.121 6	0.011 9	0.017 8	0.001 1	117	11	114	7
21QDW-TW-8	18	154	76	2.03	0.050 0	0.005 8	0.119 8	0.016 1	0.017 2	0.000 9	115	15	110	6
21QDW-TW-9	11	93	45	2.07	0.049 0	0.007 2	0.139 5	0.024 3	0.020 0	0.002 1	133	22	128	13
21QDW-TW-10	28	263	112	2.34	0.046 2	0.004 2	0.117 8	0.012 3	0.018 6	0.000 8	113	11	119	5
21QDW-TW-11	8	71	49	1.45	0.053 2	0.005 6	0.144 3	0.027 3	0.020 2	0.002 6	137	24	129	16
大崂樱桃谷二长花岗岩(样品点经纬度坐标: N36°14'28.94", E120°33'29.35")														
21QDD-TW-1	57	445	274	1.62	0.048 8	0.002 1	0.125 9	0.006 6	0.018 8	0.000 5	120	6	120	3
21QDD-TW-2	95	854	230	3.71	0.048 7	0.002 1	0.127 5	0.007 2	0.018 7	0.000 6	122	7	120	4
21QDD-TW-3	65	551	254	2.17	0.051 2	0.002 2	0.130 8	0.006 3	0.018 7	0.000 5	125	6	119	3
21QDD-TW-4	22	223	58	3.87	0.065 6	0.009 5	0.132 4	0.021 6	0.018 6	0.001 7	126	19	119	11
21QDD-TW-5	176	1 450	477	3.04	0.047 8	0.002 0	0.123 7	0.006 2	0.018 8	0.000 5	118	6	120	3
21QDD-TW-6	62	509	204	2.49	0.053 1	0.004 0	0.135 4	0.010 3	0.018 6	0.000 7	129	9	119	4
21QDD-TW-7	10	90	66	1.37	0.046 9	0.006 7	0.132 3	0.028 6	0.020 3	0.001 8	126	26	130	12
21QDD-TW-8	131	1 088	533	2.04	0.049 4	0.001 4	0.126 6	0.004 0	0.018 6	0.000 4	121	4	119	2
21QDD-TW-9	179	1 551	499	3.11	0.052 5	0.002 3	0.130 5	0.006 3	0.018 0	0.000 4	125	6	115	3
21QDD-TW-10	82	654	384	1.7	0.045 4	0.001 8	0.114 0	0.005 3	0.018 1	0.000 4	110	5	116	3
21QDD-TW-11	18	160	72	2.23	0.054 3	0.005 8	0.128 6	0.015 3	0.018 9	0.001 4	123	14	121	9
21QDD-TW-12	201	1 920	525	3.66	0.052 8	0.002 0	0.126 7	0.006 8	0.017 2	0.000 5	121	6	110	3
21QDD-TW-13	114	912	435	2.1	0.049 4	0.001 5	0.126 9	0.004 3	0.018 8	0.000 4	121	4	120	3
21QDD-TW-14	32	264	158	1.67	0.048 7	0.002 6	0.127 6	0.008 0	0.019 2	0.000 7	122	7	123	5
21QDD-TW-15	141	1 120	454	2.47	0.050 4	0.001 4	0.127 8	0.004 4	0.018 4	0.000 4	122	4	118	2
21QDD-TW-16	87	671	337	1.99	0.050 9	0.002 2	0.133 2	0.006 4	0.019 1	0.000 5	127	6	122	3
21QDD-TW-17	160	1 287	564	2.28	0.049 7	0.001 5	0.126 9	0.004 1	0.018 6	0.000 4	121	4	119	2
21QDD-TW-18	96	860	193	4.46	0.050 0	0.002 4	0.126 6	0.006 6	0.018 6	0.000 6	121	6	119	4
21QDD-TW-19	63	489	322	1.52	0.052 4	0.001 8	0.134 8	0.005 4	0.018 7	0.000 4	128	5	120	3
21QDD-TW-20	93	753	440	1.71	0.047 5	0.001 6	0.121 9	0.004 8	0.018 8	0.000 5	117	4	120	3
21QDD-TW-21	54	501	117	4.3	0.053 4	0.005 4	0.130 2	0.016 6	0.017 6	0.001 0	124	15	113	7
21QDD-TW-22	24	198	114	1.74	0.048 5	0.003 5	0.123 2	0.010 3	0.018 6	0.000 9	118	9	119	6

续表 1

Continued Table 1

测定点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ
21QDD-TW-23	81	664	346	1.92	0.048 0	0.001 6	0.124 8	0.005 4	0.018 8	0.000 5	119	5	120	3
21QDD-TW-24	46	389	204	1.91	0.051 2	0.003 5	0.127 6	0.008 3	0.018 6	0.000 7	122	7	119	4
21QDD-TW-25	60	491	333	1.47	0.047 4	0.001 8	0.121 7	0.006 3	0.018 4	0.000 5	117	6	118	3
21QDD-TW-26	33	295	111	2.66	0.050 3	0.004 0	0.128 1	0.010 2	0.019 1	0.000 9	122	9	122	6
21QDD-TW-27	46	360	290	1.24	0.052 3	0.002 3	0.135 7	0.007 6	0.018 7	0.000 5	129	7	119	3
21QDD-TW-28	110	917	444	2.07	0.049 7	0.001 5	0.128 0	0.005 0	0.018 7	0.000 4	122	5	119	3
21QDD-TW-29	75	623	379	1.64	0.046 8	0.001 8	0.118 2	0.004 8	0.018 5	0.000 4	113	4	118	3
21QDD-TW-30	148	1 181	551	2.14	0.046 8	0.001 4	0.120 4	0.004 3	0.018 7	0.000 4	115	4	119	2
仰口正长花岗岩(样品点经纬度坐标: N36°14'16.39", E120°39'49.12")														
21QDY-TW-1	235	1 855	726	2.55	0.049 5	0.001 2	0.128 1	0.003 9	0.018 8	0.000 4	122	3	120	2
21QDY-TW-2	41	346	95	3.63	0.051 2	0.004 0	0.135 7	0.012 8	0.019 7	0.000 9	129	11	126	6
21QDY-TW-3	45	345	247	1.39	0.049 9	0.002 1	0.130 4	0.006 9	0.018 8	0.000 6	124	6	120	3
21QDY-TW-4	353	2 753	833	3.3	0.049 5	0.001 3	0.128 0	0.004 0	0.018 8	0.000 4	122	4	120	3
21QDY-TW-5	53	403	222	1.81	0.048 2	0.002 7	0.126 3	0.009 5	0.018 9	0.000 7	121	9	120	4
21QDY-TW-6	102	785	414	1.9	0.049 8	0.001 7	0.131 3	0.004 9	0.019 3	0.000 5	125	4	123	3
21QDY-TW-7	43	313	212	1.48	0.050 6	0.002 3	0.127 4	0.007 2	0.018 2	0.000 6	122	6	117	4
21QDY-TW-8	117	888	503	1.76	0.050 9	0.001 9	0.129 8	0.005 1	0.018 7	0.000 4	124	5	119	3
21QDY-TW-9	83	665	333	2	0.051 4	0.002 0	0.134 3	0.005 4	0.019 2	0.000 4	128	5	123	3
21QDY-TW-10	63	527	214	2.47	0.054 1	0.005 1	0.141 4	0.012 8	0.019 3	0.000 8	134	11	123	5
21QDY-TW-11	376	3 106	918	3.38	0.051 5	0.001 2	0.132 7	0.003 6	0.018 8	0.000 3	127	3	120	2
21QDY-TW-12	39	316	178	1.77	0.048 2	0.002 5	0.128 6	0.008 0	0.019 3	0.000 8	123	7	123	5
21QDY-TW-13	87	750	205	3.66	0.048 4	0.002 4	0.126 5	0.006 9	0.019 2	0.000 5	121	6	123	3
21QDY-TW-14	91	731	385	1.9	0.046 0	0.001 7	0.119 5	0.005 4	0.018 8	0.000 4	115	5	120	3
21QDY-TW-15	52	405	234	1.73	0.048 5	0.002 2	0.126 1	0.006 4	0.019 2	0.000 7	121	6	123	4
21QDY-TW-16	29	250	102	2.45	0.056 5	0.007 3	0.143 3	0.0212	0.019 8	0.001 5	136	19	127	9
21QDY-TW-17	346	2 842	912	3.12	0.049 2	0.001 4	0.131 6	0.004 4	0.019 5	0.000 4	126	4	124	2
21QDY-TW-18	129	1 023	517	1.98	0.047 0	0.001 6	0.122 1	0.004 6	0.019 0	0.000 4	117	4	121	3
21QDY-TW-19	77	602	338	1.78	0.052 7	0.002 4	0.137 6	0.006 6	0.019 2	0.000 4	131	6	123	3
21QDY-TW-20	93	716	402	1.78	0.048 0	0.001 8	0.126 8	0.005 5	0.019 2	0.000 5	121	5	123	3
21QDY-TW-21	65	513	337	1.52	0.051 2	0.001 5	0.134 2	0.005 6	0.019 1	0.000 5	128	5	122	3
21QDY-TW-22	45	345	223	1.55	0.051 1	0.002 4	0.131 2	0.006 5	0.019 0	0.000 5	125	6	121	3
21QDY-TW-23	62	528	240	2.19	0.050 6	0.002 3	0.126 6	0.006 3	0.018 5	0.000 6	121	6	118	4
21QDY-TW-24	227	1 894	615	3.08	0.051 0	0.001 4	0.132 0	0.004 3	0.018 9	0.000 4	126	4	121	3
毛公山花岗岩(样品点经纬度坐标: N36°15'43.18", E120°29'13.98")														
21QDM-TW-1	65	476	479	0.99	0.046 9	0.001 5	0.113 4	0.004 4	0.017 4	0.000 3	109	4	111	2
21QDM-TW-2	27	211	133	1.6	0.049 1	0.003 8	0.117 1	0.009 9	0.017 8	0.000 7	112	9	114	5
21QDM-TW-3	154	1 217	806	1.51	0.052 7	0.001 2	0.130 8	0.004 0	0.018 0	0.000 3	125	4	115	2
21QDM-TW-4	65	425	762	0.56	0.049 8	0.001 4	0.125 4	0.004 4	0.018 3	0.000 4	120	4	117	3
21QDM-TW-5	101	839	437	1.92	0.050 3	0.001 6	0.119 0	0.004 7	0.017 3	0.000 4	114	4	110	2
21QDM-TW-6	108	872	508	1.72	0.049 9	0.002 7	0.120 9	0.006 8	0.017 8	0.000 6	116	6	114	4
21QDM-TW-7	86	674	438	1.54	0.049 6	0.001 8	0.121 0	0.004 9	0.017 9	0.000 4	116	4	114	3
21QDM-TW-8	116	946	504	1.88	0.048 1	0.001 5	0.119 1	0.004 4	0.018 0	0.000 4	114	4	115	3
21QDM-TW-9	65	525	311	1.69	0.053 7	0.002 2	0.128 2	0.005 6	0.017 6	0.000 4	123	5	112	3
21QDM-TW-10	60	449	332	1.35	0.051 9	0.002 0	0.133 4	0.006 4	0.018 7	0.000 5	127	6	119	3
21QDM-TW-11	29	224	195	1.15	0.051 2	0.003 5	0.123 6	0.009 7	0.017 8	0.000 9	118	9	114	6
21QDM-TW-12	127	1 067	496	2.15	0.051 0	0.001 7	0.123 1	0.005 0	0.017 6	0.000 4	118	4	112	2
21QDM-TW-13	80	625	379	1.65	0.049 0	0.001 8	0.119 6	0.005 1	0.017 7	0.000 4	115	5	113	2
21QDM-TW-14	69	542	389	1.39	0.047 1	0.001 4	0.119 9	0.004 7	0.018 5	0.000 4	115	4	118	3
21QDM-TW-15	60	446	500	0.89	0.050 2	0.001 3	0.125 1	0.004 4	0.018 1	0.000 4	120	4	115	2
21QDM-TW-16	28	223	229	0.97	0.051 6	0.002 2	0.132 0	0.006 4	0.018 7	0.000 5	126	6	120	3
21QDM-TW-17	41	334	248	1.35	0.047 4	0.001 8	0.118 0	0.005 5	0.018 2	0.000 5	113	5	117	3
21QDM-TW-18	16	127	125	1.01	0.051 5	0.003 1	0.126 4	0.008 5	0.018 8	0.000 9	121	8	120	6
21QDM-TW-19	68	557	289	1.93	0.049 4	0.001 6	0.121 6	0.005 3	0.017 9	0.000 5	117	5	114	3
21QDM-TW-20	23	186	108	1.71	0.050 5	0.003 2	0.129 3	0.011 8	0.019 0	0.001 0	123	11	121	6
21QDM-TW-21	20	151	145	1.04	0.051 5	0.002 9	0.127 0	0.007 2	0.018 2	0.000 6	121	7	117	4
21QDM-TW-22	38	294	276	1.06	0.047 0	0.001 9	0.116 6	0.005 7	0.017 9	0.000 5	112	5	114	3
21QDM-TW-23	22	185	116	1.59	0.053 1	0.003 8	0.126 3	0.008 4	0.017 8	0.000 6	121	8	114	4
21QDM-TW-24	39	315	204	1.54	0.053 7	0.004 5	0.126 3	0.012 1	0.017 2	0.000 9	121	11	110	5

表2 崂山花岗岩锆石 Hf 同位素数据
Table 2 Zircon Hf isotopic of the Laoshan granites

测定点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Hf/Hf}}$
太平角石英二长岩($t=129\text{ Ma}$)									
21QDT-TW1-01	0.023 799	0.000 943	0.282 180	0.000 019	-20.92	-18.18	1 508	2 320	-0.97
21QDT-TW1-02	0.035 512	0.001 370	0.282 206	0.000 017	-20.03	-17.32	1 490	2 267	-0.96
21QDT-TW1-03	0.022 341	0.000 877	0.282 173	0.000 024	-21.18	-18.43	1 515	2 335	-0.97
21QDT-TW1-04	0.033 213	0.001 290	0.282 192	0.000 019	-20.52	-17.81	1 506	2 297	-0.96
21QDT-TW1-05	0.036 329	0.001 397	0.282 197	0.000 021	-20.33	-17.63	1 503	2 285	-0.96
21QDT-TW1-06	0.036 983	0.001 422	0.282 181	0.000 016	-20.91	-18.22	1 527	2 322	-0.96
21QDT-TW1-07	0.029 200	0.001 174	0.282 171	0.000 026	-21.26	-18.54	1 531	2 342	-0.96
21QDT-TW1-08	0.028 318	0.001 124	0.282 211	0.000 022	-19.86	-17.13	1 473	2 255	-0.97
21QDT-TW1-09	0.031 553	0.001 189	0.282 164	0.000 017	-21.50	-18.79	1 541	2 357	-0.96
21QDT-TW1-10	0.038 938	0.001 389	0.282 222	0.000 018	-19.46	-16.76	1 468	2 232	-0.96
21QDT-TW1-11	0.029 535	0.001 087	0.282 194	0.000 018	-20.43	-17.70	1 494	2 290	-0.97
21QDT-TW1-12	0.028 163	0.001 084	0.282 179	0.000 018	-20.97	-18.24	1 516	2 324	-0.97
21QDT-TW1-13	0.019 245	0.000 733	0.282 199	0.000 018	-20.27	-17.52	1 474	2 279	-0.98
21QDT-TW1-14	0.039 979	0.001 587	0.282 184	0.000 018	-20.78	-18.10	1 529	2 315	-0.95
21QDT-TW1-15	0.035 755	0.001 487	0.282 167	0.000 020	-21.40	-18.71	1 549	2 353	-0.96
21QDT-TW1-16	0.023 907	0.000 842	0.282 188	0.000 017	-20.66	-17.91	1 494	2 303	-0.97
21QDT-TW1-17	0.026 053	0.001 004	0.282 219	0.000 018	-19.57	-16.83	1 457	2 236	-0.97
21QDT-TW1-18	0.031 327	0.001 144	0.282 143	0.000 020	-22.24	-19.52	1 568	2 402	-0.97
21QDT-TW1-19	0.048 370	0.001 529	0.282 208	0.000 021	-19.96	-17.27	1 493	2 263	-0.95
21QDT-TW1-20	0.033 807	0.001 280	0.282 190	0.000 018	-20.58	-17.87	1 508	2 300	-0.96
大崂樱桃谷二长花岗岩($t=119\text{ Ma}$)									
21QDD-TW-01	0.077 203	0.002 969	0.282 179	0.000 018	-20.96	-18.60	1 595	2 338	-0.91
21QDD-TW-02	0.069 050	0.002 402	0.282 255	0.000 023	-18.27	-15.86	1 460	2 168	-0.93
21QDD-TW-03	0.074 413	0.002 675	0.282 168	0.000 021	-21.35	-18.96	1 598	2 361	-0.92
21QDD-TW-04	0.051 718	0.001 862	0.282 171	0.000 020	-21.24	-18.79	1 558	2 350	-0.94
21QDD-TW-05	0.094 782	0.003 341	0.282 209	0.000 021	-19.91	-17.57	1 567	2 275	-0.90
21QDD-TW-06	0.076 281	0.002 654	0.282 185	0.000 024	-20.77	-18.38	1 573	2 325	-0.92
21QDD-TW-07	0.045 281	0.001 701	0.282 168	0.000 022	-21.37	-18.90	1 557	2 357	-0.95
21QDD-TW-08	0.074 572	0.002 738	0.282 244	0.000 021	-18.68	-16.29	1 490	2 195	-0.92
21QDD-TW-09	0.084 562	0.003 223	0.282 195	0.000 018	-20.39	-18.05	1 582	2 304	-0.90
仰口正长花岗岩($t=121\text{ Ma}$)									
21QDY-TW-01	0.138 027	0.005 381	0.282 215	0.000 020	-19.70	-17.47	1 653	2 271	-0.84
21QDY-TW-02	0.115 540	0.004 266	0.282 243	0.000 026	-18.70	-16.39	1 557	2 203	-0.87
21QDY-TW-03	0.108 640	0.004 117	0.282 199	0.000 018	-20.26	-17.93	1 617	2 299	-0.88
21QDY-TW-04	0.102 258	0.003 925	0.282 170	0.000 019	-21.27	-18.93	1 651	2 361	-0.88
21QDY-TW-05	0.085 491	0.002 971	0.282 137	0.000 022	-22.47	-20.05	1 657	2 430	-0.91
21QDY-TW-06	0.073 423	0.002 762	0.282 210	0.000 019	-19.86	-17.43	1 540	2 268	-0.92
21QDY-TW-07	0.086 219	0.003 382	0.282 229	0.000 024	-19.20	-16.82	1 539	2 230	-0.90
21QDY-TW-08	0.078 015	0.002 889	0.282 206	0.000 019	-20.02	-17.59	1 552	2 278	-0.91
21QDY-TW-09	0.119 041	0.003 985	0.282 258	0.000 024	-18.17	-15.83	1 522	2 168	-0.88
21QDY-TW-10	0.112 405	0.003 907	0.282 220	0.000 020	-19.51	-17.16	1 575	2 251	-0.88
21QDY-TW-11	0.127 125	0.004 472	0.282 279	0.000 020	-17.44	-15.14	1 512	2 126	-0.87
21QDY-TW-12	0.112 815	0.003 706	0.282 266	0.000 025	-17.88	-15.52	1 497	2 149	-0.89
21QDY-TW-13	0.086 001	0.003 130	0.282 221	0.000 020	-19.49	-17.09	1 541	2 246	-0.91
21QDY-TW-14	0.113 869	0.003 972	0.282 187	0.000 020	-20.70	-18.36	1 629	2 325	-0.88
21QDY-TW-15	0.111 732	0.003 464	0.282 238	0.000 022	-18.87	-16.49	1 529	2 210	-0.90
21QDY-TW-16	0.120 847	0.004 368	0.282 255	0.000 021	-18.29	-15.98	1 544	2 178	-0.87
21QDY-TW-17	0.089 403	0.003 289	0.282 179	0.000 021	-20.99	-18.59	1 610	2 340	-0.90
21QDY-TW-18	0.086 956	0.003 200	0.282 144	0.000 021	-22.22	-19.82	1 658	2 416	-0.90
21QDY-TW-19	0.096 269	0.003 220	0.282 246	0.000 021	-18.59	-16.19	1 507	2 191	-0.90
21QDY-TW-20	0.135 782	0.004 515	0.282 280	0.000 020	-17.40	-15.10	1 512	2 123	-0.86

续表 2

Continued Table 2

测定点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	f_{Hf}
毛公山花岗岩斑岩 ($t = 115 \text{ Ma}$)									
21QDM-TW-01	0.051 813	0.001 820	0.282 181	0.000 016	-20.92	-18.54	1 543	2 332	-0.95
21QDM-TW-02	0.040 068	0.001 474	0.282 111	0.000 019	-23.36	-20.97	1 627	2 482	-0.96
21QDM-TW-03	0.054 277	0.001 848	0.282 196	0.000 017	-20.38	-18.02	1 523	2 299	-0.94
21QDM-TW-04	0.053 132	0.001 924	0.282 222	0.000 018	-19.46	-17.09	1 489	2 242	-0.94
21QDM-TW-05	0.036 748	0.001 367	0.282 132	0.000 018	-22.65	-20.25	1 594	2 437	-0.96
21QDM-TW-06	0.037 400	0.001 578	0.282 180	0.000 017	-20.93	-18.54	1 534	2 332	-0.95
21QDM-TW-07	0.047 869	0.001 753	0.282 180	0.000 019	-20.94	-18.56	1 542	2 333	-0.95
21QDM-TW-08	0.049 075	0.001 868	0.282 183	0.000 019	-20.83	-18.46	1 542	2 327	-0.94
21QDM-TW-09	0.053 189	0.002 021	0.282 213	0.000 017	-19.77	-17.42	1 506	2 262	-0.94
21QDM-TW-10	0.058 051	0.002 186	0.282 159	0.000 018	-21.66	-19.32	1 589	2 380	-0.93
21QDM-TW-11	0.041 837	0.001 668	0.282 175	0.000 021	-21.13	-18.74	1 546	2 344	-0.95
21QDM-TW-12	0.043 652	0.001 603	0.282 176	0.000 018	-21.08	-18.70	1 541	2 341	-0.95
21QDM-TW-13	0.055 488	0.002 038	0.282 215	0.000 019	-19.70	-17.35	1 504	2 258	-0.94
21QDM-TW-14	0.064 991	0.002 287	0.282 234	0.000 017	-19.02	-16.68	1 486	2 216	-0.93
21QDM-TW-15	0.051 163	0.001 914	0.282 233	0.000 019	-19.07	-16.70	1 473	2 217	-0.94
21QDM-TW-16	0.057 948	0.002 155	0.282 151	0.000 020	-21.96	-19.62	1 600	2 398	-0.94
21QDM-TW-17	0.051 361	0.001 946	0.282 181	0.000 021	-20.89	-18.53	1 548	2 331	-0.94
21QDM-TW-18	0.026 321	0.001 010	0.282 208	0.000 023	-19.95	-17.51	1 472	2 268	-0.97
21QDM-TW-19	0.050 389	0.001 792	0.282 196	0.000 019	-20.35	-17.98	1 520	2 297	-0.95
21QDM-TW-20	0.032 331	0.001 164	0.282 176	0.000 022	-21.09	-18.67	1 523	2 339	-0.96

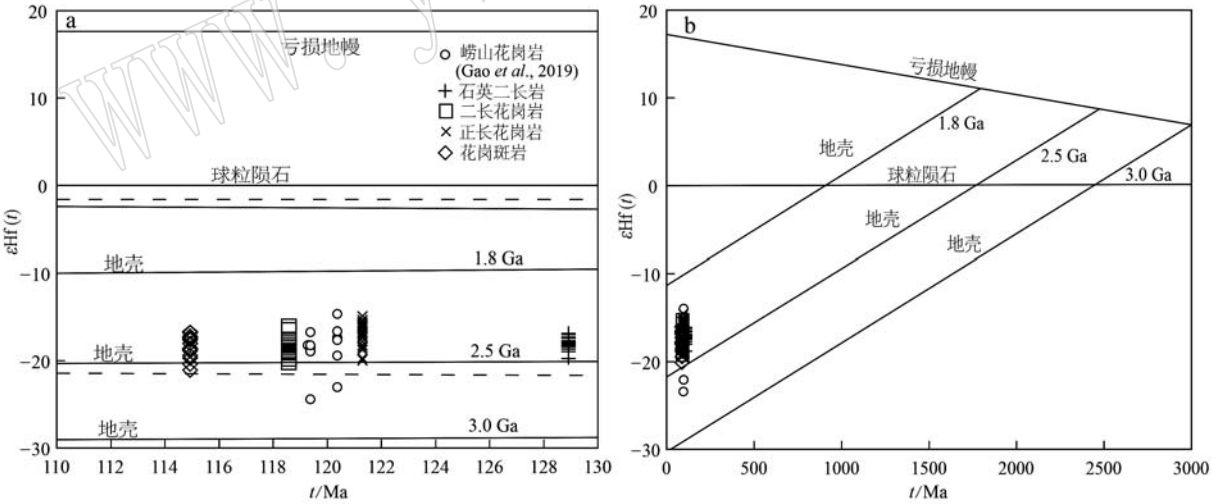


图 4 崂山早白垩世花岗质岩石锆石 Hf 同位素特征

Fig. 4 Hf isotopic characteristics of the Early Cretaceous granitoids in Laoshan

SiO₂ 含量 (62.63% ~ 77.49%), 富碱 (Na₂O + K₂O = 8.4% ~ 12.5%), 较低的 MgO (0.05% ~ 0.64%)。根据地球化学参数, 在 TAS 图解中 (图 6a), 样品点主要落入石英二长岩和花岗岩区。花岗岩样品的 A/CNK 介于 0.98 ~ 1.06, A/NK 均大于 1, 铝饱和度图解表明样品为准铝质-弱过铝质 (图 6b)。SiO₂

-K₂O 图解表明除石英二长岩属钾玄岩系列, 其余为高钾钙碱性系列 (图 6c)。除了石英二长岩的 Rittmann 系列指数 $\sigma > 3.3$ 且 < 9 (碱性), 其余样品均小于 3.3 (钙碱性)。在主量元素哈克图解中, Al₂O₃、TiO₂、Fe₂O₃^T、CaO、MgO 与 SiO₂ 具有明显的负相关关系 (图 7)。

表 3 长石电子探针分析数据

 $w_B/\%$

Table 3 Electron microprobe analytical compositions of feldspars

测试样品	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO	MnO	Cr ₂ O ₃	矿物
21QDT-1-1	11.365	0	19.279	66.9	0.071	0.275	0	0.043	0	0.008	斜长石
21QDT-1-2	11.315	0.012	19.422	66.591	0.191	0.502	0	0.163	0.044	0.058	
21QDT-1-3	11.571	0.004	19.037	67.441	0.105	0.169	0.055	0.206	0	0.058	
21QDT-1-5	11.011	0	20.024	65.997	0.242	0.916	0	0.176	0.052	0.094	
21QDT-1-11	11.244	0	19.672	66.026	0.188	0.946	0.012	0.109	0	0.14	
21QDT-2-1	11.423	0.012	19.724	66.839	0.07	0.721	0	0.084	0.012	0.064	
21QDT-3-2	11.139	0.001	20.186	66.433	0.141	1.039	0	0.076	0	0	
21QDT-3-3	11.643	0.015	19.301	67.531	0.126	0.246	0.008	0.073	0.032	0.016	
21QDT-3-4	11.074	0.015	19.374	65.939	0.17	0.821	0.008	0.41	0.069	0.025	
21QDT-3-5	11.101	0.003	20.397	67.177	0.15	1.089	0	0.299	0.029	0.015	
21QDT-4-2	11.001	0	20.219	66.927	0.171	0.98	0	0.121	0.022	0.018	
21QDT-4-3	11.467	0.01	19.609	67.551	0.091	0.502	0.02	0.08	0.037	0	
21QDT-4-4	11.649	0	19.6	67.645	0.115	0.31	0	0.049	0	0.092	
21QDT-4-5	11.307	0.036	19.451	66.918	0.13	0.272	0.003	0.11	0	0.398	
21QDT-4-6	11.359	0.047	19.517	67.238	0.199	0.194	0	0.192	0	0.12	钾长石
21QDT-4-7	11.352	0.01	19.953	66.787	0.27	0.243	0	0.014	0	0.17	
21QDT-1-7	0.597	0	18.051	63.817	15.755	0.031	0.016	0.174	0	0.002	
21QDT-1-8	0.317	0	18.05	63.99	16.38	0.012	0	0.188	0	0.03	
21QDT-1-9	0.281	0.019	17.95	63.74	16.382	0	0.008	0.158	0.033	0.064	
21QDT-1-10	0.221	0.014	17.898	62.983	16.412	0	0.016	0.086	0	0.114	
21QDT-3-6	0.753	0	18.225	64.406	15.657	0	0.042	0.138	0.023	0	
21QDT-3-7	0.271	0	18.177	63.407	16.517	0.017	0	0.029	0.004	0.074	
21QDT-3-8	0.242	0	18.156	63.391	16.242	0	0	0.052	0.077	0.281	
21QDT-3-9	0.874	0	18.102	63.827	15.314	0.012	0.001	0.077	0.039	0	
21QDT-4-8	0.586	0	18.261	63.376	15.954	0.021	0.073	0.126	0	0	
21QDT-4-9	0.403	0	18.212	63.972	16.286	0.043	0.004	0.082	0	0.048	
21QDT-4-10	0.302	0	18.172	64.501	16.484	0	0	0.104	0.017	0	
21QDW-1-1	10.844	0	19.867	66.095	0.352	1	0.022	0.138	0.043	0.023	斜长石
21QDW-2-1	11.2	0.01	19.588	66.373	0.368	0.544	0	0.048	0.008	0.01	
21QDW-4-1	11.115	0	19.71	66.576	0.327	0.728	0	0.068	0.048	0	
21QDW-4-2	10.994	0	19.792	65.955	0.419	0.77	0	0.082	0	0.01	
21QDW-4-3	11.164	0.003	19.46	66.867	0.322	0.527	0	0.033	0.01	0	
21QDW-4-4	11.236	0.006	19.491	66.337	0.405	0.565	0	0.063	0	0	
21QDW-4-5	10.878	0	19.642	66	0.439	0.798	0	0.115	0.034	0.086	
21QDW-4-6	11.092	0.035	19.39	66.556	0.115	0.375	0.005	0.114	0.015	0.041	
21QDW-4-7	10.946	0.002	19.704	65.63	0.391	1.029	0.003	0.156	0	0.033	
21QDW-5-1	10.714	0.001	19.929	65.764	0.346	1.163	0	0.236	0.017	0.044	
21QDW-5-2	10.536	0.004	20.139	64.878	0.31	1.438	0	0.137	0.007	0	
21QDW-5-3	10.736	0.005	20.054	65.492	0.228	1.18	0	0.129	0.03	0.013	
21QDW-5-4	11.115	0	19.482	66.854	0.291	0.503	0.005	0.099	0.037	0.048	
21QDW-6-1	11.037	0	19.359	66.083	0.362	0.568	0.018	0.08	0	0.012	钾长石
21QDW-6-2	10.636	0.007	19.983	65.729	0.434	1.141	0	0.172	0	0.013	
21QDW-6-3	11.012	0.007	19.825	66.077	0.236	0.957	0	0.073	0.028	0.003	
21QDW-3-1	0.309	0	18.053	63.833	16.682	0	0.012	0.014	0.001	0.031	
21QDW-3-2	0.288	0	17.914	63.269	16.656	0	0	0	0	0.061	
21QDW-4-8	0.449	0	17.903	63.398	16.121	0	0.017	0.044	0.019	0.06	
21QDW-4-9	0.291	0	18.249	63.481	16.426	0	0.046	0	0.022	0.033	
21QDW-4-10	0.295	0	17.834	63.771	16.341	0	0	0.015	0	0.015	
21QDW-5-5	1.269	0	18.049	63.888	15.678	0	0	0.073	0	0.056	
21QDW-5-6	0.173	0	17.897	63.747	16.779	0	0	0.028	0	0.119	
21QDW-5-7	0.343	0	17.914	63.438	16.469	0.001	0.004	0.038	0	0.048	
21QDW-6-4	0.388	0	17.999	63.389	16.224	0	0.017	0.016	0.026	0.142	
21QDW-6-5	0.702	0	17.899	63.593	15.952	0.011	0	0.126	0.008	0.02	
21QDW-6-6	0.357	0	17.996	63.345	16.391	0.006	0	0	0	0.154	

续表 3-1

Continued Table 3-1

测试样品	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO	MnO	Cr ₂ O ₃	矿物
21QDD-6-1	11.915	0	18.997	69.102	0.39	0.019	0	0.721	0.014	0	斜长石
21QDD-6-2	11.706	0	18.451	68.337	0.235	0	0.039	0.901	0	0	
21QDD-6-3	11.883	0	18.562	68.856	0.252	0	0	0.764	0.034	0.03	
21QDD-7-1	11.887	0	18.691	69.459	0.186	0.013	0	0.943	0	0.01	
21QDD-8-1	12.024	0.011	18.696	69.366	0.234	0	0	0.951	0.016	0.035	
21QDD-8-2	11.648	0	18.831	69.081	0.334	0.004	0	0.677	0.01	0.012	
21QDD-8-3	11.942	0	18.981	69.01	0.186	0	0.005	0.623	0.003	0	
21QDD-8-4	11.831	0	18.906	69.035	0.269	0	0	0.615	0.053	0	
21QDD-8-5	11.613	0	18.72	68.87	0.244	0.007	0.031	0.667	0	0	
21QDD-8-6	11.848	0.015	18.884	69.039	0.209	0.007	0	0.772	0	0	
21QDD-8-7	11.815	0	19.067	69.067	0.156	0.014	0	0.59	0	0.035	
21QDD-8-8	11.71	0.007	18.827	68.947	0.231	0.007	0	0.583	0.022	0	
21QDD-9-2	11.776	0.012	19.134	68.419	0.183	0.015	0.017	0.342	0	0	
21QDD-9-3	11.86	0.022	19.137	69.488	0.143	0.011	0	0.421	0.016	0.007	
21QDD-9-4	11.952	0.019	19.178	69.244	0.143	0	0.044	0.385	0	0.032	
21QDD-9-5	11.603	0	19.037	69.826	0.114	0	0	0.464	0	0.08	
21QDD-9-6	11.772	0.016	18.717	68.705	0.135	0	0	0.704	0.014	0.022	
21QDD-9-7	11.79	0.01	18.414	68.442	0.242	0	0.007	1.23	0	0	
21QDD-9-8	11.801	0	18.88	68.872	0.267	0	0.001	0.574	0	0.027	
21QDD-9-9	11.676	0	19.007	69.115	0.135	0.021	0	0.491	0.022	0.071	
21QDD-9-15	11.659	0	18.612	68.671	0.14	0.006	0.003	0.665	0.019	0.326	
21QDF-1-1	11.193	0	20.122	67.635	0.145	0.998	0	0.137	0	0	钾长石
21QDF-1-2	10.857	0	20.36	67.359	0.419	1.253	0.004	0.113	0.021	0.299	
21QDF-1-3	10.329	0	21.261	66.239	0.593	2.205	0.029	0.198	0	0	
21QDF-1-4	11.284	0	20.299	67.315	0.169	1.177	0	0.074	0.018	0.018	
21QDF-1-5	9.807	0	21.423	65.533	0.535	2.761	0	0.182	0	0.055	
21QDF-1-6	10.849	0	20.584	66.831	0.229	1.392	0	0.078	0.014	0.198	
21QDD-7-2	0.249	0	18.074	64.22	16.467	0.013	0	0.051	0	1.022	
21QDD-7-3	0.212	0	18.289	65.181	16.687	0	0.014	0.119	0.027	0.043	
21QDD-8-9	0.175	0	18.029	64.766	16.862	0	0	0.177	0	0.405	
21QDD-8-10	0.243	0.02	18.039	64.246	16.463	0	0.049	0.085	0	0.473	
21QDD-9-1	11.78	0	19.034	68.734	0.137	0.021	0	0.36	0	0	斜长石
21QDD-9-11	0.21	0.008	17.996	64.468	16.617	0	0	0.185	0.01	0.732	
21QDD-9-12	0.247	0	18.057	64.948	16.718	0	0.021	0.415	0.015	0.197	
21QDD-9-13	0.287	0	17.847	63.855	16.437	0	0.015	0.363	0.001	0.56	
21QDD-9-14	0.261	0	18.019	64.763	16.668	0.003	0.049	0.34	0.004	0.27	
21QDF-2-1	10.167	0.012	21.497	65.833	0.62	2.448	0	0.2	0.015	0.052	
21QDF-2-2	10.324	0.007	20.987	66.271	0.728	2.068	0.007	0.187	0.01	0	
21QDF-2-3	10.567	0	21.074	66.713	0.389	2.046	0	0.182	0.011	0	
21QDF-2-4	10.364	0	20.897	66.33	0.579	1.795	0.008	0.168	0.021	0	
21QDF-2-5	11.685	0	19.646	68.486	0.19	0.287	0	0.161	0.025	0	
21QDF-2-6	10.575	0	21.044	66.751	0.319	1.974	0.016	0.189	0.04	0.032	斜长石
21QDF-2-7	11.968	0	19.514	68.579	0.248	0.136	0	0.19	0.022	0.017	
21QDF-2-8	11.048	0.006	19.479	69.043	0.343	0.915	0	0.014	0	0	
21QDF-2-10	10.859	0.004	20.404	66.544	0.395	1.49	0	0.133	0.012	0.558	
21QDF-3-1	11.751	0.004	19.841	69.108	0.372	0.328	0	0.093	0	0	
21QDF-3-2	11.715	0	19.757	69.084	0.287	0.331	0	0.122	0	0	
21QDF-3-3	8.774	0	14.77	78.922	0.243	0.408	0.029	0.178	0.015	0.038	
21QDF-3-5	10.635	0.016	20.926	67.006	0.634	1.902	0.037	0.142	0	0.027	
21QDF-3-6	10.271	0.01	21.015	66.847	0.788	1.986	0.017	0.207	0.015	0	
21QDF-3-7	10.329	0	21.128	66.904	0.565	2.163	0	0.209	0.004	0.017	
21QDF-3-8	10.974	0	20.854	67.127	0.394	1.553	0	0.185	0.019	0	
21QDF-3-9	10.67	0	20.894	66.82	0.607	1.813	0.003	0.149	0	0	
21QDF-3-10	10.322	0	20.949	66.832	0.743	2.046	0	0.194	0.004	0	

续表 3-2

Continued Table 3-2

测试样品	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO	MnO	Cr ₂ O ₃	矿物
21QDY-2-1	10.728	0.01	20.616	67.593	0.686	1.388	0.025	0.191	0	0.045	斜长石
21QDY-3-1	10.724	0	20.325	67.69	0.712	1.214	0	0.167	0.04	0.047	
21QDY-3-2	10.934	0	20.435	67.417	0.315	1.377	0	0.177	0.037	0.01	
21QDY-3-3	11.248	0.021	20.229	67.842	0.133	0.93	0.004	0.203	0	0.105	
21QDY-3-4	11.136	0.01	20.362	67.171	0.128	1.315	0	0.152	0	0.037	
21QDY-4-1	11.059	0.03	20.075	67.865	0.317	0.87	0.017	0.156	0	0.086	
21QDY-4-2	10.739	0	20.416	67.585	0.724	1.428	0	0.164	0.005	0.008	
21QDY-5-1	10.457	0	20.482	67.252	0.921	1.414	0.001	0.156	0.015	0	
21QDY-5-2	11.03	0.027	20.306	67.361	0.211	1.256	0	0.186	0.011	0.166	
21QDY-5-3	10.983	0.002	20.322	67.365	0.607	1.329	0	0.131	0.001	0.035	
21QDY-5-4	10.678	0.021	20.341	67.208	0.563	1.205	0	0.234	0.033	0.015	
21QDY-5-5	10.537	0.04	20.059	67.773	0.798	0.942	0	0.243	0	0.156	
21QDY-5-7	10.588	0	20.437	67.269	0.999	1.295	0	0.191	0	0.025	
21QDY-6-1	10.274	0	20.307	66.76	1.152	1.335	0.031	0.264	0.003	0	
21QDY-6-2	11.077	0.005	20.37	67.39	0.332	1.322	0.013	0.209	0.007	0.042	
21QDY-6-3	10.83	0.027	20.301	67.147	0.902	1.295	0.003	0.24	0.026	0.183	
21QDY-6-4	10.152	0.009	20.158	67.344	1.456	1.231	0	0.185	0.007	0.017	
21QDY-6-5	10.909	0	20.359	67.064	0.354	1.36	0	0.154	0.007	0.051	
21QDY-6-6	11.605	0.007	19.545	68.391	0.184	0.396	0	0.237	0.015	0.012	
21QDY-6-7	10.729	0	20.421	66.944	0.664	1.461	0	0.161	0	0	
21QDY-8-2	11.436	0.01	19.405	67.585	0.124	0.162	0.016	0.069	0.003	1.102	
21QDY-8-3	11.604	0	20.034	68.42	0.206	0.726	0	0.18	0	0.023	
21QDY-9-1	11.077	0.032	20.291	66.913	0.736	0.212	0	0.21	0.041	0.227	
21QDY-9-2	11.002	0.024	19.984	66.887	0.221	1.087	0.042	0.191	0	0.204	
21QDY-9-3	11.538	0.013	19.627	67.915	0.144	0.436	0	0.159	0	0.184	
21QDY-9-4	11.647	0.004	19.271	68.635	0.178	0.227	0.043	0.198	0	0.284	
21QDY-9-5	11.961	0	19.614	69.03	0.097	0.12	0.026	0	0	0.02	
21QDY-9-6	11.572	0.001	20.069	67.562	0.14	0.848	0.004	0.167	0	0.103	
21QDF-1-7	0.85	0.006	18.326	64.866	15.205	0.009	0.001	0	0.007	0.032	钾长石
21QDF-2-9	0.185	0	18.176	64.526	16.529	0	0	0.048	0.022	0.423	
21QDF-3-11	1.048	0	18.398	65.861	15.908	0.034	0.021	0.124	0.007	0	
21QDF-3-12	0.295	0	18.352	64.532	16.533	0	0.029	0.204	0	0.238	
21QDF-3-13	0.405	0	18.327	65.606	16.514	0	0	0.173	0	0.058	
21QDY-9-7	0.574	0	18.331	64.458	16.413	0.001	0	0.163	0.047	0.245	
21QDY-9-8	0.236	0.007	18.236	64.336	16.513	0	0.024	0.01	0	0.585	
21QDY-9-9	0.282	0	18.348	65.011	16.238	0.005	0.032	0.047	0	0.002	

4.4.2 全岩微量元素

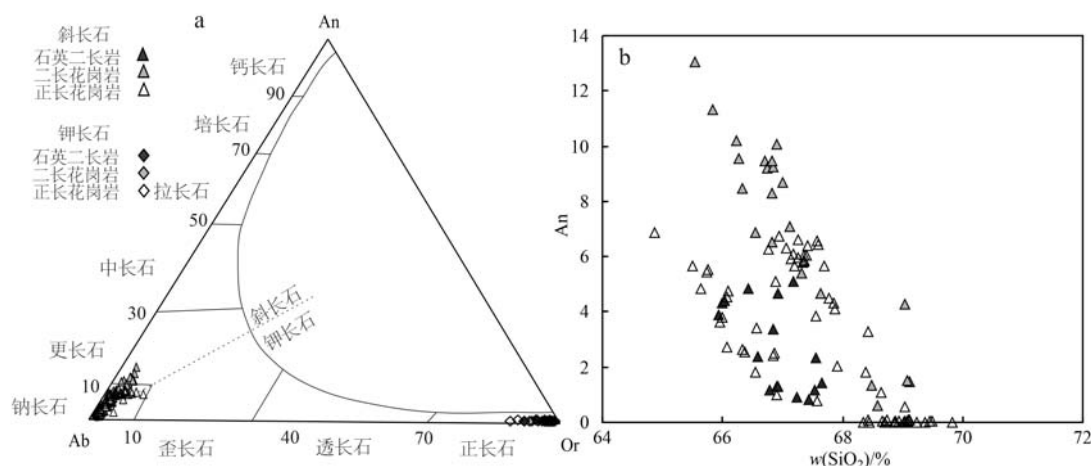
稀土元素球粒陨石标准化模式图呈现富集轻稀土(LREE), 亏损重稀土(HREE), 轻-重稀土分异明显的右倾模式(图 8a)。石英二长岩、二长花岗岩、正长花岗岩、花岗斑岩具有不同程度的 Eu 负异常, 分别为 0.55~0.60、0.41~0.67、0.15~0.36、0.10~0.12, 轻-重稀土分异程度(LREE/HREE)_N 分别为 5.17~5.43、4.41~6.28、3.76~5.48、2.65~8.86, (La/Yb)_N 平均值为 17.69、17.37、14.31、12.22, (Ce/Yb)_N 为 13.00、11.56、10.25、5.33。微量元素原始地幔标准化蛛网图显示(图 8b)大离子亲石元

素 Rb、Th、U、K、Pb 相对富集, Ba、Sr、Eu 相对亏损, 同时亦亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti, 具弧岩浆岩地球化学特征。

5 讨论

5.1 成因类型

划分花岗岩成因类型对于探讨花岗岩起源和演化过程有着重要意义, 花岗岩成因类型主要被划分为 I 型、S 型和 A 型。其中, 依据源区性质将花岗质岩石分为 I 型和 S 型(Chappell and White, 1974), I 型

图5 An-Ab-Or图解(a)和An-SiO₂图解(b)Fig. 5 An-Ab-Or diagram (a) and An-SiO₂ diagram (b)

花岗岩源岩为火成岩,多为准铝质-弱过铝质,含角闪石,A/CNK值通常小于1.1;S型花岗岩源岩为沉积岩,多为过铝质,含原生石榴石、堇青石等富铝矿物,A/CNK值大于1.1(Chappell and White, 1992)。Loiselle和Wones(1979)提出A型花岗岩的概念,后续学者们对A型花岗岩的划分进行了完善(Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1990; 刘昌实等, 2003; 张旗等, 2012; 张旗, 2013; 汪洋等, 2013),A型花岗岩通常含碱性铁镁质矿物,高 FeO^T/MgO 、Ga/Al,富集Zr、Nb等高场强元素(Whalen *et al.*, 1987)。崂山花岗岩样品呈现准铝质-弱过铝质的特征,A/CNK均小于1.1, P_2O_5 与 SiO_2 (图9a)均具有负相关关系,Rb与Th呈现正相关关系(图9b), TiO_2 -Zr图解中落于I型花岗岩区域(图9c),同时矿物组合没有S型花岗岩典型的富铝矿物,因此排除样品为S型花岗岩的可能。石英二长岩、二长花岗岩10 000 Ga/Al值基本低于2.60[A型花岗岩的下限值(Whalen *et al.*, 1987)](图9d),其中二长花岗岩部分样品的10 000 Ga/Al值略高于2.60,可能与斜长石经历分离结晶有关,使得10 000 Ga/Al比值升高,从而在其相关地球化学图解中会造成部分重叠(Whalen *et al.*, 1987),而且在高分异图解(图9e)中,二长花岗岩落于高分异钙碱性区域,指示二长花岗岩发生一定程度的结晶分异。而且石英二长岩、二长花岗岩的 FeO^T/MgO 为3.17~4.98,不符合A型花岗岩显著富铁的特征(Wu *et al.*, 2017)。综上分析,崂山石英二长岩、二长花岗岩应属于I型花岗岩。正长花岗岩、花岗斑岩均有A型花岗岩高硅高碱特征,

但是当 $\text{SiO}_2 > 74\%$,各类花岗岩的碱含量基本重叠。对于高硅质花岗岩,不应将碱含量作为花岗岩分类的可靠证据(Eby *et al.*, 1990)。正长花岗岩、花岗斑岩虽在10 000 Ga/Al-FeO/MgO图解(图9a)显示A型花岗岩特征,但在图9e中样品落入高分异区域。Rb/Nb值不易受岩浆分异作用及岩体后期改造影响(Christiansen *et al.*, 1996),100Rb/Nb-Rb图解表明正长花岗岩和花岗斑岩具有I型花岗岩特征(图9f)。因此,正长花岗岩、花岗斑岩的成因类型需从各方面综合判定。

所测地球化学数据显示,正长花岗岩和花岗斑岩具有如下特征:①富硅, SiO_2 含量大于75%,高的分异指数($\text{DI}=97.67、96.88$)和低的固结指数($\text{SI}=0.86、0.75$),反映其经历了高度的结晶分异;②高Rb/Sr值(12.3~95.3)和低K/Rb值(131.4~212.6)、Nb/Ta值(13.0~19.7)和Zr/Hf值(17.6~26.0),均表明其经历了高度演化;③锆石微量元素记录了寄主岩石形成演化信息(Griffin *et al.*, 2002; 吴元保等, 2004)。崂山花岗岩样品的锆石具有较高Hf含量,显著的Ce正异常和Eu负异常,富集重稀土元素、亏损轻稀土元素,其稀土元素球粒陨石标准化图解呈左倾型(图10),具有高分异花岗岩的锆石特征;④在花岗质岩浆中,锆石作为较早结晶的副矿物,锆石中的Zr分配系数受温度影响较大,而其他因素可忽略不计,因此锆石饱和温度与岩浆液相线温度接近(King *et al.*, 1997)。样品的锆石饱和温度(T_z)为761℃~831℃,集中于775℃~805℃,低于A型花岗岩形成温度833℃(刘昌实等, 2003),

表 4 崂山花岗岩主量元素 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 含量

Table 4 Contents of major elements ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) of the Laoshan granites

样品号	石英二长岩						二长花岗岩						正长花岗岩						花岗岩岩															
	21QDT-		21QDT-		21QDT-		21QDD-		21QDD-		21QDD-		21QDF-		21QDF-		21QDF-		21QDW-		21QDW-		21QDW-		21QDY-		21QDY-		21QDY-		21QDM-		21QDM-	
	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	
SiO ₂	62.63	68.75	69.29	73.09	73.40	72.92	73.84	73.54	73.94	77.49	77.33	77.49	77.18	77.38	76.55	75.27	76.09	75.84																
Al ₂ O ₃	19.04	15.57	15.39	13.82	13.78	13.92	13.80	13.91	13.75	12.32	12.46	12.35	12.03	11.93	12.18	13.57	12.94	13.07																
Fe ₂ O ₃ ^T	2.28	2.30	2.24	1.60	1.50	1.56	1.36	1.40	1.40	0.76	0.75	0.69	1.02	0.98	1.22	0.97	0.97	1.00																
MgO	0.65	0.62	0.61	0.31	0.27	0.30	0.25	0.27	0.26	0.07	0.12	0.05	0.09	0.07	0.09	0.09	0.07	0.11																
CaO	0.82	1.04	0.66	0.56	0.65	0.75	0.80	0.86	0.79	0.20	0.22	0.18	0.18	0.17	0.20	0.15	0.25	0.24																
Na ₂ O	5.96	4.55	4.46	4.60	4.52	4.56	4.18	4.26	4.18	4.10	4.13	3.82	4.44	4.42	4.53	3.97	4.28	4.18																
K ₂ O	6.50	5.38	5.65	4.72	4.91	4.83	5.01	5.06	5.00	4.31	4.37	4.66	4.32	4.19	4.29	5.10	4.59	4.88																
MnO	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.06	0.06	0.06	0.01	0.01	0.01	0.07	0.13	0.10	0.00	0.01	0.01																
TiO ₂	0.48	0.51	0.47	0.29	0.24	0.28	0.24	0.25	0.24	0.09	0.11	0.10	0.11	0.10	0.13	0.16	0.11	0.12																
P ₂ O ₅	0.11	0.11	0.12	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02																
LOI	1.38	0.99	0.96	0.79	0.51	0.64	0.32	0.26	0.25	0.53	0.41	0.55	0.46	0.54	0.62	0.60	0.57	0.52																
TOTAL	99.90	99.89	99.91	99.91	99.90	99.90	99.90	99.90	99.90	99.89	99.91	99.91	99.90	99.91	99.92	99.91	99.90	99.98																
Sc	6.4	6.5	5.8	3.8	4.1	3.7	3.9	4.1	3.9	2.5	2.6	2.9	3.0	2.0	1.9	2.0	2.6	1.8																
Ti	3 068	3 277	2 909	1 729	1 641	1 667	1 448	1 483	1 460	574	610	636	642	597	796	946	674	714																
V	26	27	24	11	10	10	7	7	8	2	2	2	1	1	2	3	2	1																
Cr	3	3	2	1	1	3	1	1	1	1	6	1	1	1	0	1	1	1																
Mn	450	541	527	626	676	648	415	474	437	45	124	54	572	943	727	36	35	63																
Co	4.2	2.5	2.6	1.2	1.1	1.0	0.5	0.8	0.5	0.1	0.2	0.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.1	0.2																
Ni	2	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																
Cu	2.3	6.2	3.1	0.4	0.3	0.4	0.2	0.3	0.2	7.6	2.7	1.6	0.6	0.5	0.2	0.5	0.5	0.3																
Zn	80.3	142.0	84.9	47.0	46.1	44.8	31.8	35.5	32.9	111.1	56.9	35.5	30.8	53.6	57.1	18.5	22.9	30.3																
Ga	21.1	18.7	18.5	20.2	20.3	18.5	16.4	16.7	16.2	17.1	17.8	18.5	19.9	19.3	19.1	18.8	18.5	19.4																
Ge	1.2	1.3	1.3	1.5	1.5	1.4	1.2	1.3	1.2	1.4	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7	1.4	1.4	1.5																
Rb	152.9	132.4	141.4	161.8	168.2	153.8	155.0	156.4	146.2	257.5	274.0	294.3	218.9	207.8	211.6	232.7	220.3	190.6																
Sr	193.4	215.2	168.2	100.2	84.3	98.6	116.7	126.4	121.6	12.3	11.9	14.5	2.3	2.5	2.5	18.9	10.9	12.9																
Zr	327.1	362.0	317.4	269.3	281.1	269.7	146.7	166.4	149.5	112.0	114.0	113.3	221.1	199.9	270.5	189.7	136.5	184.7																
Nb	26.2	28.1	23.8	29.5	31.5	29.6	17.9	18.3	18.3	40.6	42.7	47.7	39.5	38.7	44.0	57.4	58.4	56.1																
Cs	0.70	1.02	0.80	0.88	1.24	0.89	1.11	1.03	0.93	1.17	1.54	0.71	0.79	0.83	0.80	0.97	0.91	0.96																

续表 4
Continued Table 4

样品号	石英二长岩						二长花岗岩						正长花岗岩						花岗斑岩		
	21QDT- H1	21QDT- H2	21QDT- H3	21QDD- H1	21QDD- H2	21QDD- H3	21QDD- H1	21QDD- H2	21QDD- H3	21QDF- H1	21QDF- H2	21QDF- H3	21QDW- H1	21QDW- H2	21QDW- H3	21QDY- H1	21QDY- H2	21QDY- H3	21QDM- H1	21QDM- H2	21QDM- H3
Ba	1 705.2	1 311.5	1 238.0	558.5	438.1	595.6	678.9	754.9	688.3	37.6	36.3	42.7	12.8	23.4	13.4	104.9	61.6	79.3			
Hf	9.12	9.97	8.81	8.44	8.77	8.41	5.08	6.21	5.24	6.37	6.40	5.96	9.17	8.24	10.42	7.76	6.55	7.99			
Ta	1.60	1.83	1.43	1.80	1.85	1.75	1.10	1.14	1.11	2.49	2.78	3.06	2.26	2.19	2.24	4.10	4.19	4.30			
Pb	73.91	66.94	36.06	18.49	26.88	19.94	27.16	28.18	26.90	258.49	16.89	35.04	28.28	50.71	6.27	14.39	18.83	20.20			
Th	15.98	15.88	19.81	15.86	17.16	18.19	15.90	13.46	21.26	27.20	28.59	32.87	20.28	17.85	21.77	18.38	17.18	19.82			
U	1.42	1.59	1.63	1.89	3.07	1.83	2.04	7.06	2.28	3.38	3.27	4.86	4.21	5.00	3.21	2.30	6.21	3.45			
La	70.91	92.29	67.53	53.28	62.66	63.33	55.62	56.05	50.85	19.59	48.77	34.39	30.60	26.67	31.65	79.55	57.15	38.52			
Ce	137.90	169.34	129.48	100.13	106.03	109.52	92.64	93.67	88.39	15.67	40.62	43.38	45.78	40.98	48.44	142.52	103.25	77.61			
Pr	15.19	17.98	14.70	10.39	10.51	10.96	9.07	9.20	8.83	1.67	4.01	3.40	4.31	3.90	5.13	17.03	11.41	10.12			
Nd	52.58	61.17	52.51	35.45	34.56	35.74	30.73	30.10	29.69	3.71	9.25	8.40	11.85	11.36	15.37	56.13	36.72	32.79			
Sm	8.00	9.28	7.90	5.47	5.27	5.36	4.36	4.31	4.15	0.36	0.78	0.91	1.92	1.94	2.73	9.21	6.24	6.56			
Eu	1.36	1.47	1.37	0.74	0.64	0.71	0.76	0.79	0.78	0.04	0.06	0.06	0.09	0.10	0.14	0.26	0.17	0.21			
Gd	6.22	7.14	6.21	4.44	4.27	4.55	3.37	3.47	3.08	0.36	0.52	0.74	1.67	1.84	2.29	5.92	4.57	4.33			
Tb	0.92	1.07	0.89	0.70	0.68	0.69	0.48	0.50	0.46	0.08	0.09	0.13	0.33	0.34	0.46	0.98	0.72	0.78			
Dy	5.18	6.24	4.94	4.02	3.98	4.03	2.58	2.79	2.55	0.58	0.62	0.92	2.16	2.35	3.14	5.57	4.08	4.40			
Ho	1.06	1.24	1.03	0.85	0.87	0.89	0.56	0.57	0.54	0.17	0.17	0.25	0.53	0.59	0.76	1.08	0.85	0.84			
Er	3.06	3.70	2.95	2.65	2.60	2.69	1.66	1.69	1.64	0.73	0.69	1.02	1.90	2.05	2.61	3.05	2.52	2.38			
Tm	0.44	0.56	0.45	0.45	0.42	0.44	0.27	0.28	0.26	0.16	0.15	0.21	0.35	0.37	0.45	0.46	0.41	0.40			
Yb	2.85	3.60	2.88	2.99	2.95	2.99	1.93	1.91	1.89	1.40	1.33	1.73	2.62	2.69	3.13	3.23	2.70	2.74			
Lu	0.47	0.56	0.46	0.47	0.48	0.47	0.32	0.33	0.30	0.26	0.25	0.31	0.44	0.43	0.51	0.48	0.42	0.42			

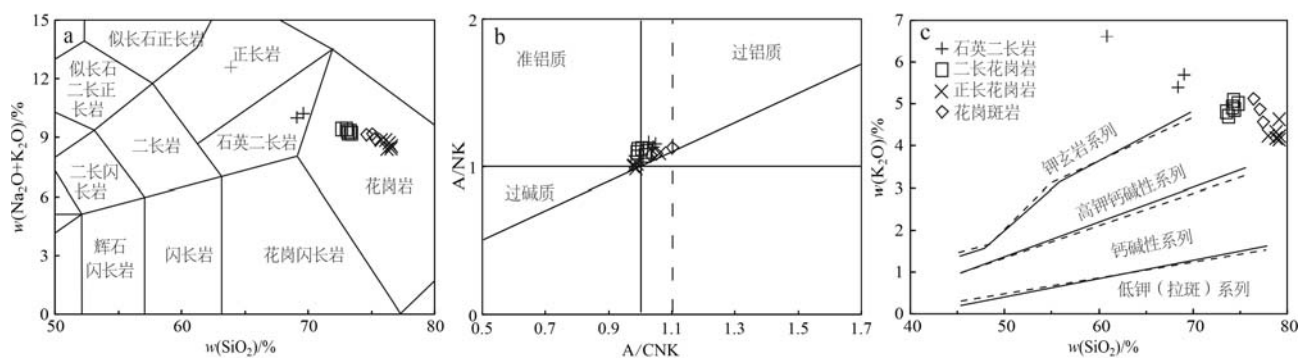
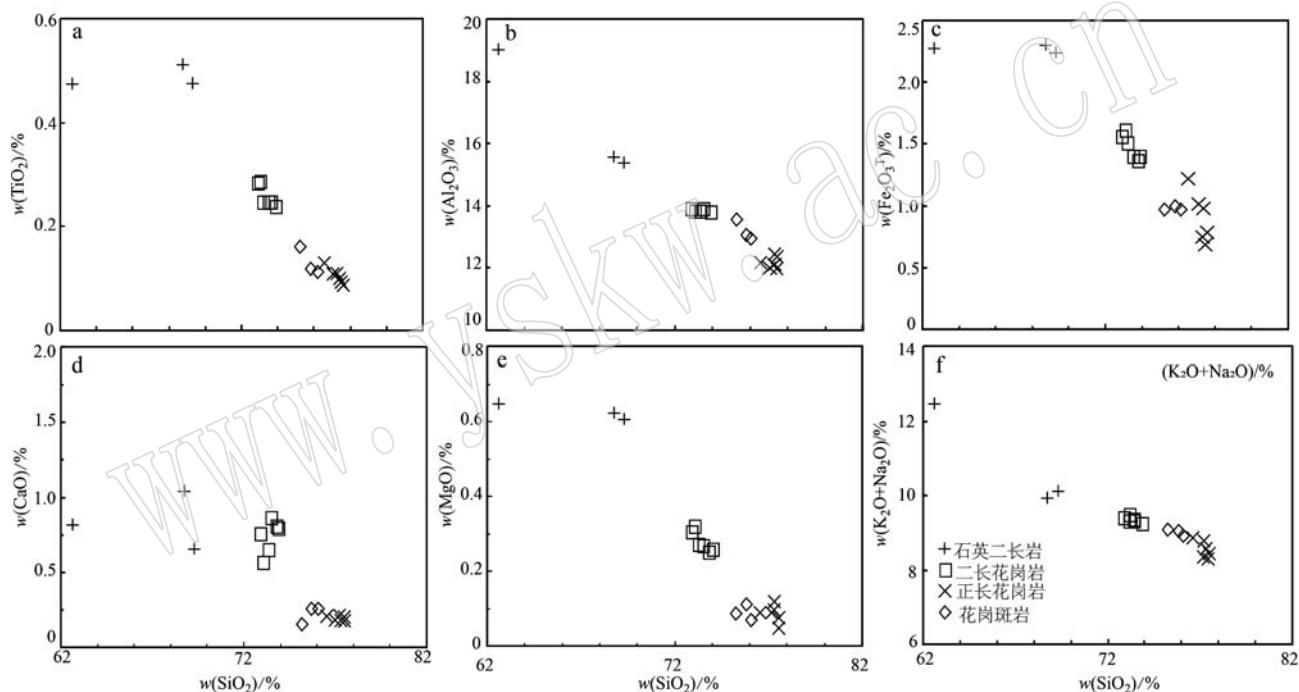
图6 崂山花岗岩 TAS 图解(a)、A/NK-A/CNK 图解(b)和 K_2O-SiO_2 图解(c)Fig. 6 TAS (a), A/NK-A/CNK (b) and K_2O-SiO_2 (c) diagram of granite in Laoshan

图7 崂山花岗岩主量元素哈克图解

Fig. 7 Harker diagrams of major elements for the Laoshan granite

而更接近高分异 I 型花岗岩形成温度 $764^{\circ}C$ (King *et al.*, 1997)。 P_2O_5 、 TiO_2 饱和温度计投点图解同样也未显示出高温花岗岩的特征(图 11)。(5) P_2O_5 含量普遍低于 0.10%, 且与 SiO_2 含量呈负相关, 与高分异 S 型花岗岩特征不同。除去 21QDY-H3 样品, FeO^T 值均小于 1, 符合高度结晶分异 I 型花岗岩 FeO^T 小于 1 的特征(王强等, 2000)。(6) A 型花岗岩的特征矿物通常为铁橄榄石、钠闪石-钠铁闪石、霓石等(Chappell, 1999), 然而在崂山花岗岩薄片未观察到典型的 A 型花岗岩标志性矿物。上述的综合特征表明正长花岗岩、花岗斑岩属于高分异 I 型

花岗岩。

5.2 岩石成因

锆石具有较高的封闭温度, 保留初始 Hf 同位素特征, 且受放射性同位素 ^{176}Lu 的影响较小, 因此锆石 Hf 同位素可以记录不同岩浆源区性质(Griffin *et al.*, 2002; 吴福元等, 2007)。崂山花岗岩的锆石颗粒具有负的 $\epsilon Hf(t)$ 值, 表明岩石可能起源于古老地壳的重熔, 其 $\epsilon Hf(t)$ 值主要集中在 $-22.4 \sim -15.1$, 指示岩浆可能起源于同一源区, 介于 2.5~1.8 Ga 地壳演化线之间(图 4)。Hf 同位素模式年龄约为亏损地幔熔融出岩浆的时代, 由于崂山岩体为花岗质岩

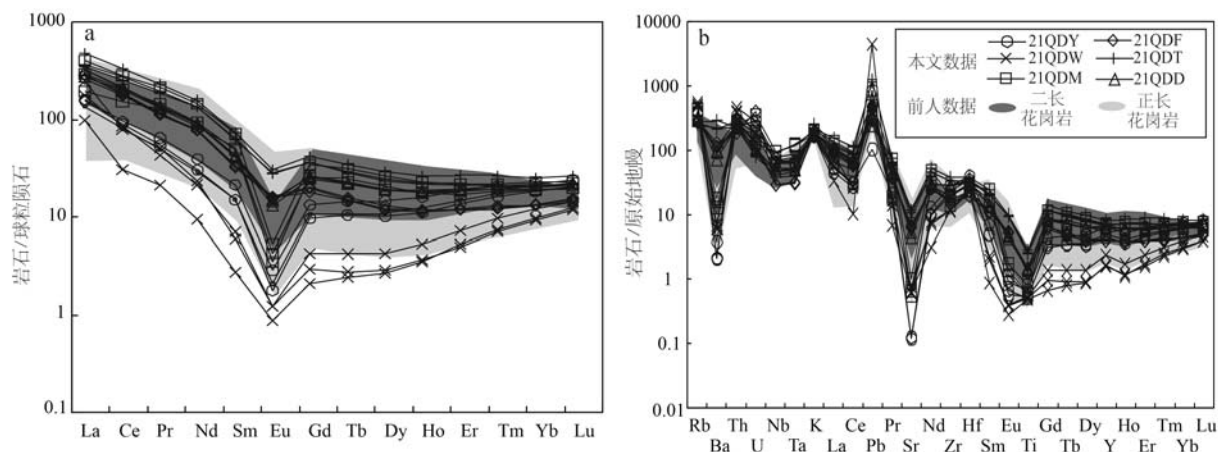


图8 崂山花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(二长花岗岩和正长花岗岩的数据引自 Goss *et al.*, 2010; Yan and Shi, 2014; Gao *et al.*, 2019; 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns (a) and Primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) for Laoshan granite (the published data for monzogranites and syenogranites are from Goss *et al.*, 2010; Yan and Shi, 2014; Gao *et al.*, 2019. the normalized values are after Sun and McDonough, 1989)

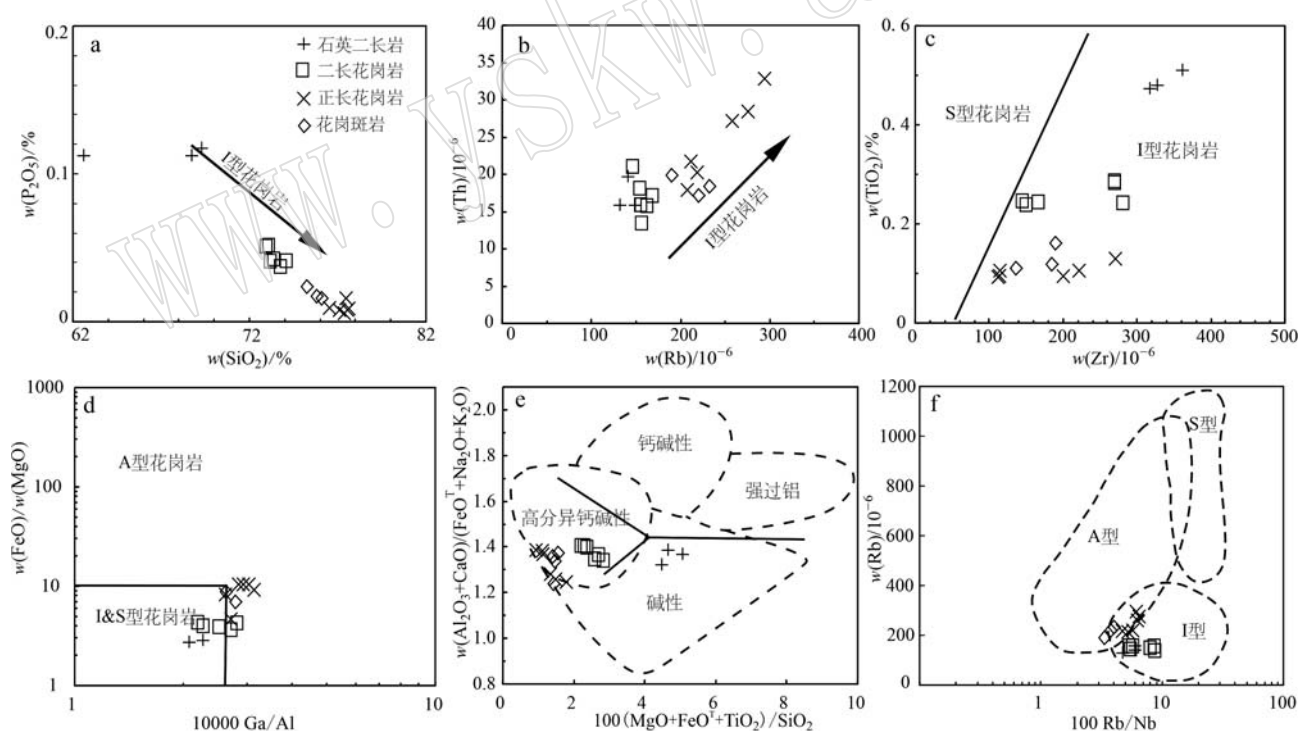


图9 P_2O_5 - SiO_2 图解(a, 据 Harrison and Watson, 1984); Th-Rb 图解(b, 据 Chappell, 1999); TiO_2 -Zr 图解(c, 据 King *et al.*, 1997); FeO/MgO -10000 Ga/Al 图解(d, 据 Whalen *et al.*, 1987); $(Al_2O_3+CaO)/(FeO+Na_2O+K_2O)-100(MgO+FeO+TiO_2)/SiO_2$ 图解(e, 据 Sylvester, 1989); Rb-100 Rb/Nb 图解(f, 据 Christiansen *et al.*, 1996)

Fig. 9 P_2O_5 - SiO_2 diagram (a, after Harrison and Waston, 1984); Th-Rb diagram (b, after Chappell, 1999); TiO_2 -Zr diagram (c, after King *et al.*, 1997); FeO/MgO -10000 Ga/Al diagram (d, after Whalen *et al.*, 1987); $(Al_2O_3+CaO)/(FeO+Na_2O+K_2O)-100(MgO+FeO+TiO_2)/SiO_2$ diagram (e, after Sylvester, 1989); Rb-100 Rb/Nb diagram (f, after Christiansen *et al.*, 1996)

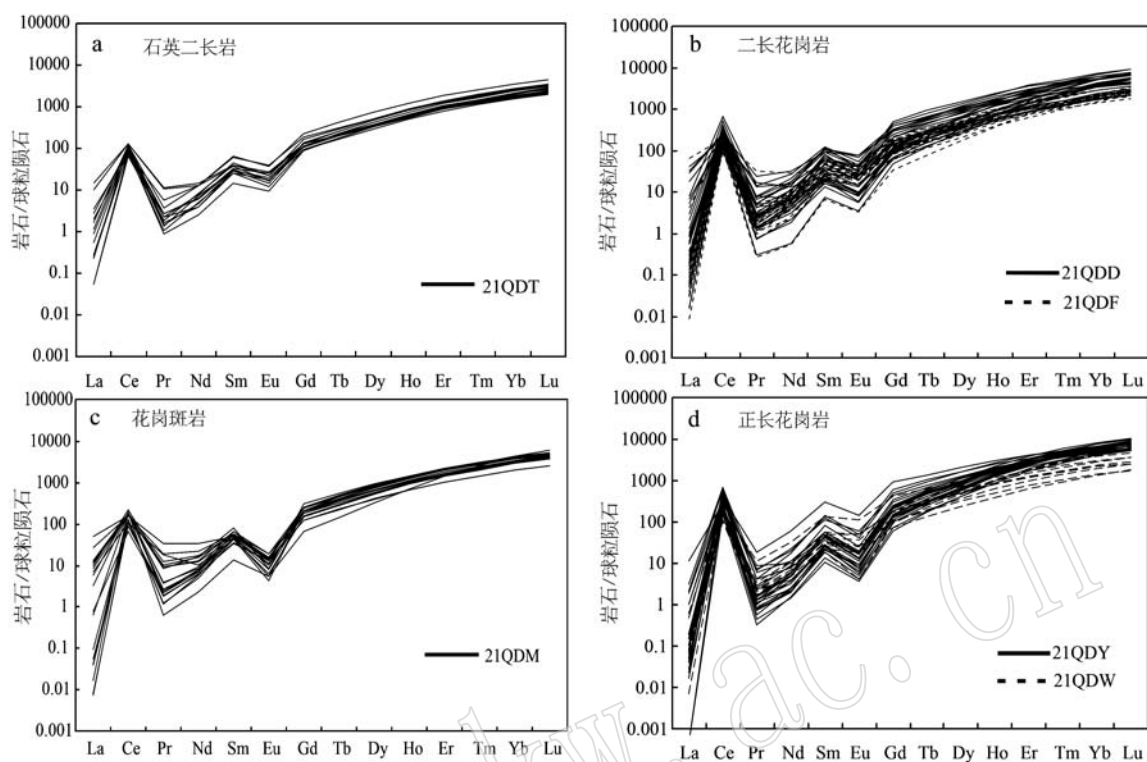


图 10 崂山花岗岩锆石稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 10 Zircon rare elements distribution diagram of the Laoshan granite (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

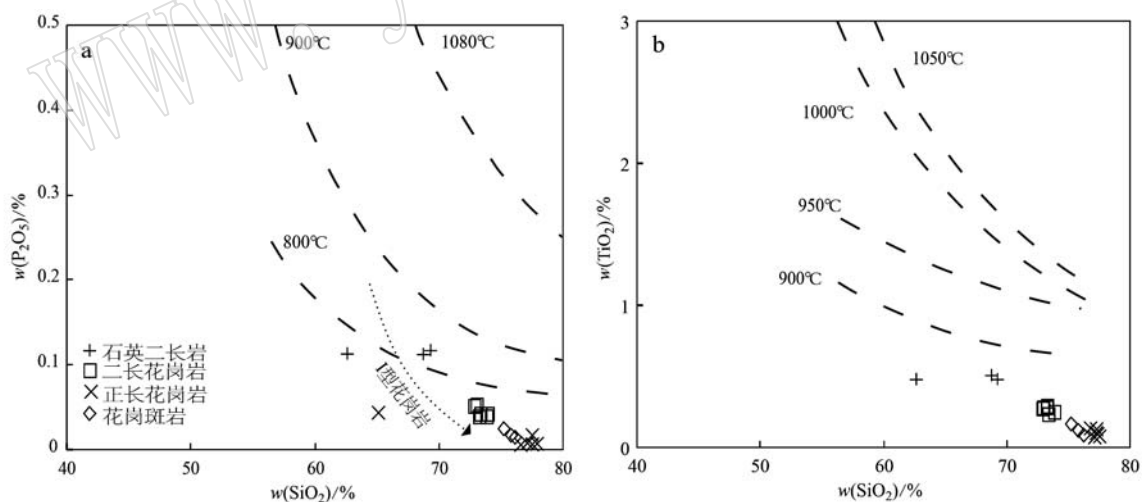


图 11 P_2O_5 - SiO_2 (a) 和 TiO_2 - SiO_2 (b) 饱和温度计曲线图(据 Harrison and Watson, 1984; Green and Pearson, 1986; I 型花岗岩趋势根据 Chappell, 1999)

Fig. 11 Diagram of saturation thermometers for P_2O_5 - SiO_2 (a) and TiO_2 - SiO_2 (b) (after Harrison and Watson, 1984; Green and Pearson, 1986; the trend of I-type granites is derived from Chappell, 1999)

石且 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 为负值, 因此以二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 指示源区形成时代更为合适 (Leake *et al.*, 1997; 吴福元等, 1999), 结合区域其他地质单元形成年代

可较好制约花岗岩源区 (Zhang *et al.*, 2010)。崂山花岗岩二阶段模式年龄集中在 2.48~2.14 Ga, 岩浆源区可能是古元古代粉子山群变质地层或大致与其

同时代的古老基底(Jahn *et al.*, 2008)。

不同的源岩熔融出不同类型的花岗岩(Gerdes *et al.*, 2000), I型花岗岩成因机制主要有壳幔混合、镁铁质熔体的分离结晶和壳源物质部分熔融(Chappell, 1999)。Nb-Ta、Zr-Hf等元素地球化学特征相似,为双胞胎元素,岩浆作用对其比值影响微小(Bau, 1996),常被用以指示源区特征(Jochum *et al.*, 1986)。崂山花岗岩岩体 Zr/Hf 平均值为 28.03, 接近地壳平均值(35.4)(Wedepohl, 1995), 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-20.97 \sim -15.10$, 介于华北克拉通下地壳 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($-28 \sim -13$, Jiang *et al.*, 2013)之间, 表明源区物质可能来源于华北克拉通地壳部分熔融。崂山花岗岩具有负 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, Nb-Ta-Ti 负异常, 强烈 Pb 正异常, 富集 LREE 和 LILE, 亏损 HFSE 的特征, 表明下地壳对源区物质有贡献(Goss *et al.*, 2010)。亦有研究指示了华北克拉通下地壳物质对于崂山花岗岩形成的贡献(赵广涛等, 1997; Goss *et al.*, 2010; Gao *et al.*, 2019)。

但下地壳具有亏损 SiO_2 和 K_2O 、无水、难熔特征, 更倾向于产生中性岩浆(Collins *et al.*, 1982; Zhang *et al.*, 2018)。华北克拉通太古代下地壳具有较低 Rb ($< 11.2 \times 10^{-6}$), 强烈亏损 Zr、Th、U(Tang *et al.*, 2009), 与崂山花岗质岩石地球化学特征存在差异, 表明长英质可能不是直接由下地壳部分熔融产生。样品 Nb/Ta 平均值为 16.134, 与幔源岩浆 Nb/Ta 值(17.5 ± 2)相近(管琪等, 2010), 该区域存

在镁铁质包裹体、同期基性岩脉(Yan and Shi, 2014; Gao *et al.*, 2019; 部雪娇等, 2021), 指示可能少量幔源物质参与成岩作用。崂山花岗岩的高 Si 低 Mg, 表明壳源物质占主导(王栋等, 2023)。

前人通过混合曲线计算, 表明源区组成约为 15% 的 OIB 型软流圈地幔源区熔体和约 85% 的下地壳熔体混合(Yan and Shi, 2014)。如果以此比例混合形成岩浆直接结晶, 难以形成上述样品的主微量元素特征。在哈克图解中, 样品的 SiO_2 与 Al_2O_3 、 CaO 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 等呈负相关(图 7), 指示岩浆演化过程中发生了矿物分离结晶。长石类矿物作为花岗岩的重要成岩矿物, 可能记录了岩浆演化的相关信息(Cao *et al.*, 2021)。钾长石和斜长石的电子探针分析结果显示其化学成分整体变化较小, 趋势平缓, 符合岩浆中长石结晶规律。背散射(BSE)图像显示三种花岗岩均发育条纹长石(图 12), 且 An 值与 SiO_2 含量呈负相关, 含量变化较大(图 5b), 这与岩浆分离结晶作用中长石晶出有关(赛盛勋等, 2016)。长石的晶出也控制了崂山岩体的 Eu、Sr、Ba 异常(Wu *et al.*, 2003), 以 $\text{Sr}(215 \times 10^{-6})$ 、 $\text{Ba}(1700 \times 10^{-6})$ 和 $\text{Rb}(132 \times 10^{-6})$ 为初始值进行分离结晶模拟, 其矢量图显示岩浆演化晚期主要分离结晶矿物为钾长石和斜长石(图 13)。岩浆分异过程中, 其结晶温度呈降低趋势, CaO 、 P_2O_5 、Eu、Zr、Sr 与 DI 呈显著负相关, 与钾长石、斜长石、磷灰石、锆石分离结晶有关(刘瑞杨等, 2023)(图 14), 与岩相学观察一致。

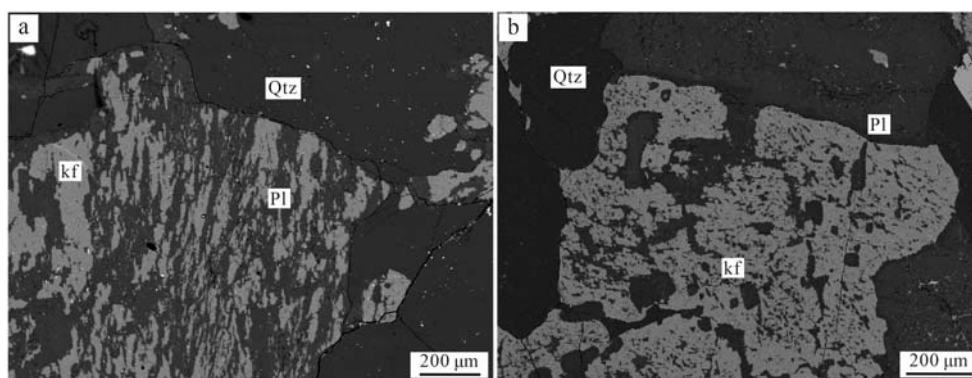


图 12 崂山花岗岩条纹长石(a)和钾长石(b)的矿物背散电子图像

Fig. 12 Electron backscatter images of perthite (a) and K-feldspar (b) in the Laoshan granite

综上所述, 软流圈地幔来源的岩浆底侵, 诱发下地壳物质部分熔融形成长英质岩浆, 母岩浆演化过程中经历了钾长石、斜长石、磷灰石等矿物不同程度的分离结晶, 最终形成不同演化程度的崂山花岗岩。

5.3 构造意义

花岗岩构造背景图解是基于花岗岩微量元素特征提出的, 被广泛用于探索其形成的构造背景(Barbarin, 1999)。然而, 花岗岩微量元素还反映了岩浆

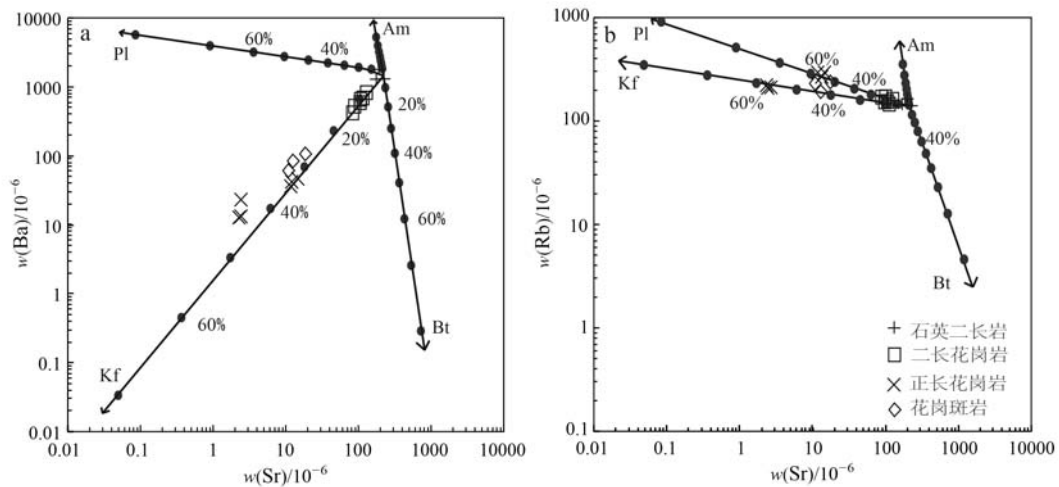


图 13 崂山花岗岩矿物分离结晶作用矢量图解

Fig. 13 Fractional crystallization modeling for the petrogenesis of the Laoshan granite

标注显示矿物相分离结晶百分比,10%为单位; Kf—钾长石; Am—角闪石; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Ba, Sr 和 Rb 的分配系数数据

Bacon and Druitt, 1988; Ewart and Griffin, 1994; Nash and Crecraft, 1985

tick marks indicate the percentage of mineral phase removed, in 10% intervals; Kf—K-feldspar; Am—amphibole; Pl—plagioclase; Bt—biotite; the partition coefficients of Ba, Sr and Rb are quoted from Bacon and Druitt, 1988; Ewart and Griffin, 1994; Nash and Crecraft, 1985

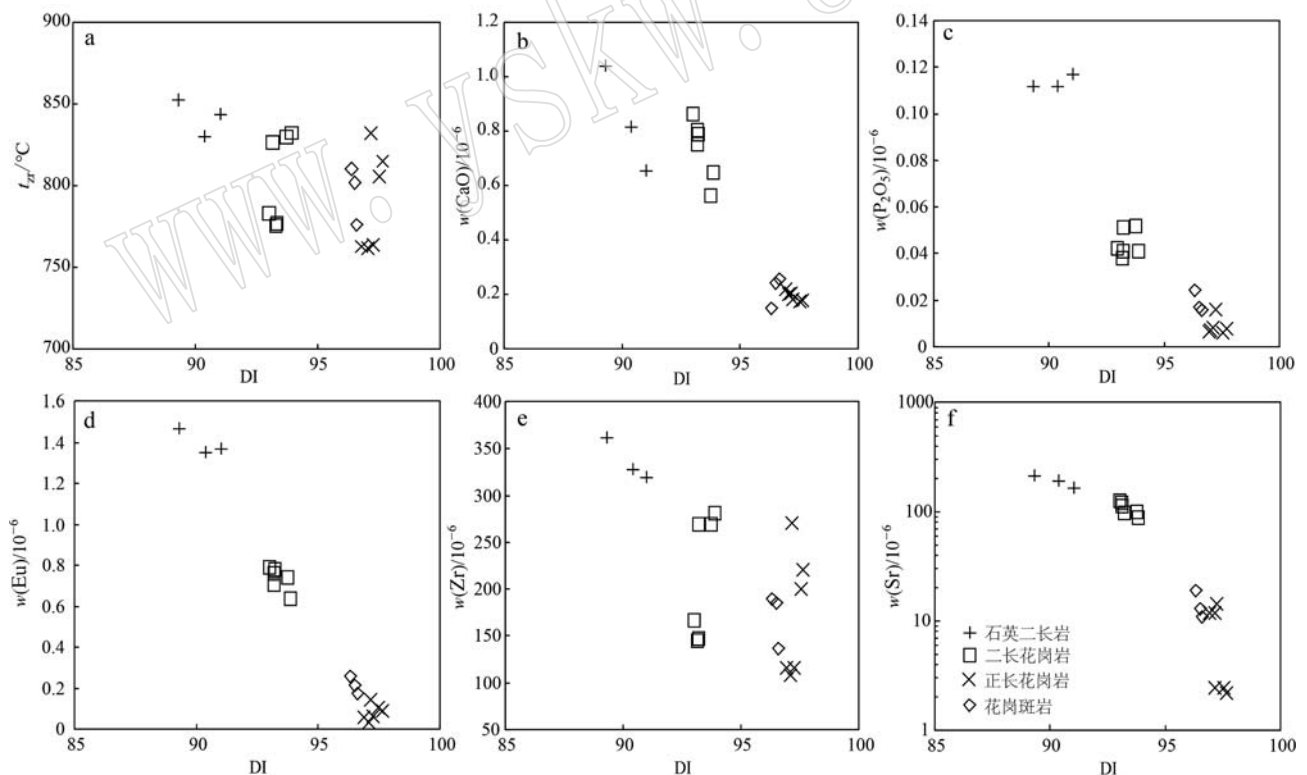


图 14 崂山花岗岩分异指数哈克图解

Fig. 14 Harker diagram of differentiation index of the Laoshan granite

源区及演化,因此对于相同的构造环境,花岗岩地球化学特征也可能表现不同(张旗等, 2007)。因此,仅以地球化学参数来判别花岗岩形成的构造背景具

有很大不确定性(邓晋福, 2015a, 2015b),需综合考虑区域构造岩浆热液事件。

中生代,华北克拉通板块周围发生了复杂的构

造事件,引起华北东部岩石圈地幔化学和物理特征强烈变化,继而发生岩石圈减薄与克拉通破坏,这与中国东部广泛的区域性岩石圈伸展时期对应(Wu *et al.*, 2005a, 2005b),是具有典型意义的陆内构造运动(Menzies *et al.*, 1993; 翟明国, 2017)。虽然现在普遍对于华北岩石圈减薄的机制仍然存在争议,主要有:①热化学侵蚀(Griffin *et al.*, 1998; Xu, 2001; Zheng *et al.*, 2001);②下地壳重力拆沉(Gao *et al.*, 2004, 2008; Wu *et al.*, 2005a);③古太平洋板块西向俯冲(Niu, 2005)。但是多数研究认为华北克拉通破坏一级机制是古太平洋板块西向俯冲,而热侵蚀和重力拆沉则是受前者影响的二级机制(郑永飞等, 2018)。

晚三叠世华南板块与华北板块碰撞,形成苏鲁超高压变质带,而后板片断离和深俯冲陆壳折返,苏鲁超高压变质岩出露(郭敬辉等, 2005);晚侏罗世至早白垩世,古太平洋板块俯冲至华北板块之下,俯冲板块脱出的流体交代并导致上覆岩石圈地幔弱化(Deng *et al.*, 2017; 郑永飞等, 2018),引发俯冲地壳的拆沉,导致加厚地壳发生部分熔融,广泛形成燕山早期I型花岗岩类(Wu *et al.*, 2005b)。大量年代学结果表明华北东部早白垩世岩浆活动强烈,出露大面积花岗岩(吴福元等, 2006; Zhao and Zheng, 2009)。华北克拉通东部广泛分布早白垩世韧性剪切带和变质核杂岩(Yang *et al.*, 2008),表明了早白垩世华北东部发生了区域伸展作用。早白垩世,俯冲的古太平洋板块持续后撤(Sun *et al.*, 2007),引发大规模的拉张(Zhang *et al.*, 2010),软流圈地幔持续上涌,提供巨大的热量,诱发下地壳发生部分熔融,岩石圈快速减薄,胶东地区发生大规模的岩浆活动(Deng *et al.*, 2017; 王栋等, 2023)。综合区域构造演化和地质背景,在太平洋板块俯冲作用产生的伸展构造环境下,软流圈上涌,提供的巨大热量诱发古老基底发生部分熔融产生花岗质岩浆,与少量软流圈幔源基性岩浆混合重熔,随后发生不同程度的分离结晶作用,最终形成了早白垩世崂山花岗岩主要岩体。

6 结论

(1) 崂山杂岩体中识别出石英二长岩、二长花岗岩、正长花岗岩、花岗斑岩,形成时代介于 128.6 ± 2.7 Ma~ 114.5 ± 1.2 Ma,指示它们均为早白垩世岩

浆活动产物。

(2) 崂山早白垩世岩体具有高硅富碱,贫铝、镁、铁,属于钾玄质-高钾钙碱性系列、准铝质-弱过铝质岩石。二长花岗岩、石英二长岩属于I型花岗岩,正长花岗岩、花岗斑岩经历了高度演化,为高分异I型花岗岩。

(3) 软流圈地幔来源的岩浆底侵,诱发下地壳物质部分熔融形成长英质岩浆,岩浆混合形成的母岩浆经历了钾长石、斜长石、磷灰石等矿物不同程度的分离结晶,最终形成不同演化程度的崂山花岗岩。

(4) 崂山花岗岩形成于古太平洋板块西向俯冲驱动下的华北东部伸展构造环境。

References

- Bacon C R and Druitt T H. 1988. Compositional evolution of the zoned calcalkaline magma chamber of Mount Mazama, Crater Lake, Oregon [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(2): 224~256.
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments [J]. *Lithos*, 46(3): 605~626.
- Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 323~333.
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1~2): 243~258.
- Bu Xuejiao, Han Zongzhu, Weng Limeng, *et al.* 2021. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of the Lamprophyres of Qingdao, Eastern North China [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 51(2): 69~82 (in Chinese with English abstract).
- Cao M J, Evans N J, Hollings P, *et al.* 2021. Apatite texture, composition, and O-Sr-Nd isotope signatures record magmatic and hydrothermal fluid characteristics at the black Mountain porphyry deposit, Philippines [J]. *Economic Geology*, 116(5): 1 189~1 207.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S- type granites and the characterization of fractionated haplogranites [J]. *Lithos*, 46(3): 535~551.
- Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types [J]. *Pacific geology*, 8(2): 173~174.
- Chappell B W and White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*

- burgh Earth Sciences, 79: 169~181.
- Christiansen E H and Keith J D. 1996. Trace element systematics in silicic magmas: A metallogenic perspective [C]// Wyman D A (ed.) Trace element geochemistry of volcanic rocks: Applications for massive sulfide exploration. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12: 115~151.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, *et al.* 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 80(2): 189~200.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, *et al.* 2015b. Magmatic Arc and Ocean-Continent Transition: Discussion [J]. Geological Review, 61(3): 473~484 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, *et al.* 2015a. On the correct application in the common igneous petrological diagrams: Discussion and suggestion [J]. Geological Review, 61(4): 717~734 (in Chinese with English abstract).
- Deng J J, Liu X F, Wang Q F, *et al.* 2017. Isotopic characterization and petrogenetic modeling of Early Cretaceous mafic diking-Lithospheric extension in the North China craton, eastern Asia [J]. GSA Bulletin, 129(11~12): 1 379~1 407.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis [J]. Lithos, 26(1~2): 115~134.
- Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, *et al.* 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement, 70(18): A158.
- Ewart A and Griffin W L. 1994. Application of proton-microprobe data to trace-element partitioning in volcanic rocks [J]. Chemical Geology, 117(1~4): 251~284.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton [J]. Nature, 432: 892~897.
- Gao S, Rudnick R L, Xu W L, *et al.* 2008. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton [J]. Earth and Planetary Science Letters, 270(1~2): 41~53.
- Gao Y J, Niu Y L, Duan M, *et al.* 2019. The petrogenesis and tectonic significance of the Early Cretaceous intraplate granites in Eastern China: The Laoshan granite as an example [J]. Lithos, 328: 200~211.
- Gerdes A, Wörner G and Henk A. 2000. Post-collisional granite generation and HT-LP metamorphism by radiogenic heating: The Variscan South Bohemian Batholith [J]. Journal of the Geological Society, 157(3): 577~587.
- Goss S C, Wilde S A, Wu F Y, *et al.* 2010. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton [J]. Lithos, 120(3~4): 309~326.
- Green T H and Pearson N J. 1986. Ti-rich accessory phase saturation in hydrous mafic-felsic compositions at high *P*, *T* [J]. Chemical Geology, 54: 185~201.
- Griffin W L, Andi Z, O'reilly S Y, *et al.* 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton [J]. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia, 27: 107~126.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, S E China: In situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. Lithos, 61(34): 237~269.
- Guo JingHui, Chen FuKun, Zhang Xiaoman, *et al.* 2005. Evolution of syn- to post-collisional magmatism from north Sulu UHP belt, eastern China: zircon U-Pb geochronology [J]. Acta Petrologica Sinica, 21(4): 1 281~1 301 (in Chinese with English abstract).
- Guan Qi, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, *et al.* 2020. Late Cretaceous adakites in the eastern segment of the Gangdese Belt, southern Tibet: Products of Neo-Tethyan ridge subduction? [J]. Acta Petrologica Sinica, 26(7): 2 167~2 179 (in Chinese with English abstract).
- Harrison T M and Watson E B. 1984. The behavior of apatite during crustal anatexis: Equilibrium and kinetic considerations [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48(1): 1 467~1 477.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zhou Tianren, *et al.* 2007. Laser Ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications [J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2 595~2 604 (in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. LA-MC-ICP-MS in situ U-Pb dating technique for zircon microanalysis [J]. Geology of Mineral Deposits, 28(4): 481~492 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Cornichet J, Cong Bolin, *et al.* 1996. Ultrahigh- ϵ Nd eclogites from an ultrahigh-pressure metamorphic terrane of China [J]. Chemical Geology, 127(1~3): 61~79.
- Jahn B M, Liu D Y, Wan Y S, *et al.* 2008. Archean crustal evolution of the Jiaodong peninsula, China, as revealed by zircon shrimp geochronology, elemental and isotope geochemistry [J]. American Journal of Science, 308(3): 232~269.
- Jiang N, Guo J H and Chang G H. 2013. Nature and evolution of the lower crust in the eastern North China Craton: A review [J]. Earth-Science Reviews, 122: 1~9.
- Jochum K P, Seufert H M, Spettel B, *et al.* 1986. The solar-system abundances of Nb, Ta, and Y, and the relative abundances of refractory lithophile elements in differentiated planetary bodies [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 50(6): 1 173~1 183.
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt,

- southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.
- Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming minerals [J]. *American Mineral*, 68: 277~279.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles; Report of the Subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new mineral and mineral names[J]. *American Mineralogist*, 82: 1 019~1 037.
- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Chen Peirong, *et al.* 2003. Subdivision, discrimination criteria and genesis for A type rock suites[J]. *Geological Journal of China Universities*, 4: 573~591 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ruiyang, Zhou Yaoqi, Zhou Tengfei, *et al.* 2023. Geochemical characteristics and mineralization analysis of Dazhushan highly differentiated granite[J]. *Geological Review*, 69(1): 179~198 (in Chinese with English abstract).
- Loiselle M C and Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 11(7): 468.
- Menzies M A, Fan Weiming and Zhang Ming. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean Craton, China[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 76: 71~81.
- Nash W P and Crecraft H R. 1985. Partition coefficients for trace elements in silicic magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(11): 2 309~2 322.
- Niu Y L. 2005. Generation and evolution of basaltic magmas: Some basic concepts and a new view on origin of the Mesozoic-Cenozoic basaltic volcanism in Eastern China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(1): 9~46.
- Sai Shengxun, Zhao Tianming, Wang Zhongliang, *et al.* 2016. Petrogenesis of Linglong biotite granite: Constraints from mineralogical characteristics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2 477~2 493 (in Chinese with English abstract).
- Schleier P E, Gardner F M, Nelson S K, *et al.* 2001. The effect of storage time on the accuracy and dimensional stability of reversible hydrocolloid impression material[J]. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 86(3): 244~250.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society of London Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Sun W D, Ding X, Hu Y H, *et al.* 2007. The golden transformation of the Cretaceous platesubduction in the West Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3-4): 533~542.
- Sylvester P J. 1989. Post-Collisional alkaline granites[J]. *The Journal of Geology*, 97(3): 261~280.
- Tang H Y, Zheng J P and Yu C M. 2009. Age and composition of the Rushan intrusive complex in the northern Sulu Orogen, Eastern China: Petrogenesis and lithospheric mantle evolution [J]. *Geological Magazine*, 146(2): 199~215.
- Tao Youbing, Wang Laiming, Huang Yongbo, *et al.* 2021. Early Cretaceous Laoshan granite in Jiaodong Area[J]. *Shandong Land and Resources*, 37(10): 13~22 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bin, Song Mingchun, Huo Guang, *et al.* 2021. Source characteristics and tectonic evolution of Late Mesozoic granites in Jiaodong and their implications for gold mineralization [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(2): 288~320 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dong, Wang Tianqi and Li Hongyan. 2023. Petrogenesis of Early Cretaceous Laoshan A-type granites and the implications for the tectonic evolution of Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(2): 317~339 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ligong, Liu Xiuzhang, Yu Xiaowei, *et al.* 2022. Petrogenesis and tectonic setting of Dazhushan and Tianzhushan granites in Jiaodong peninsula: Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopic constrains[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 52(3): 879~898 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua and Xiong Xiaolin. 2000. The ascertainment of late-Yanshanian A-type granite in Tonghai-Dabie orogenic belt [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 297~306 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shijing, Wan Yusheng, Wang Wei, *et al.* 2010. Forming ages of granites in Laoshan area of Shandong Province- zircon SHRIMP U-Pb dating[J]. *Shandong Land and Resources*, 26(10): 1~6 (in Chinese).
- Wang Yang, Jiao Yongling, Tong Lihua, *et al.* 2013. The essence of A-type granitoids: A discussion on the opinions held by Prof. Zhang Qi and some other researchers[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(2): 260~266 (in Chinese with English abstract).
- Hans Wedepohl K. 1995. The composition of the continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1 217~1 232.
- Wei C S. 2008. ²⁰⁷Pb-²⁰⁸Pb decoupling of alkali feldspar from a late Mesozoic A-type granite in Eastern China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 94: 209~223.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, *et al.* 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis [J].

- Lithos, 66(3-4): 241~273.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, *et al.* 2005b. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in Eastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1-2): 103~119.
- Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, *et al.* 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research [J]. *Science China Earth Sciences*, 60(7): 1 201~1 219.
- Wu Fuyuan and Sun Deyou. 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 19(4): 313~318 (in Chinese).
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, *et al.* 2005a. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China[J]. *Chemical Geology*, 221(1-2): 127~156.
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Zhang Yanbin, *et al.* 2006. Emplacement ages of the Mesozoic granites in southeastern part of the Western Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 315~325 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1 589~1 604 (in Chinese).
- Xu Honglin, Zhang Dequan and Sun Guiying. 1997. Characteristics and genesis of Kunyushan granite and its relation with gold deposits in Jiaodong[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(2): 131~143 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: Evidence, timing and mechanism[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9~10): 747~757.
- Yan Q S and Shi X F. 2014. Geochemistry and petrogenesis of the Cretaceous A-type granites in the Laoshan granitic complex, Eastern China [J]. *Island Arc*, 23(3): 221~235.
- Yang J H, Chung S L, Wilde S A, *et al.* 2005a. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence [J]. *Chemical Geology*, 214(1-2): 99~125.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, *et al.* 2005b. Petrogenesis of Early Cretaceous intrusions in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, East China and their relationship to lithospheric thinning [J]. *Chemical Geology*, 222(3-4): 200~231.
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, *et al.* 2008. Petrogenesis of an alkali syenite-granite-rhyolite suite in the Yanshan fold and thrust belt, eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Sr-Hf isotopic evidence for lithospheric thinning[J]. *Journal of Petrology*, 49(2): 315~351.
- Zhai Mingguo. 2017. Granites: Leading study issue for continental evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1 369~1 380 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J, Zhao Z F, Zheng Y F, *et al.* 2010. Postcollisional magmatism: Geochemical constraints on the petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Sulu Orogen, China[J]. *Lithos*, 119(3~4): 512~536.
- Zhang J H, Gao S, Ge W C, *et al.* 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: Implications for subduction-induced delamination[J]. *Chemical Geology*, 276(3-4): 144~165.
- Zhang J H, Yang J H, Chen J Y, *et al.* 2018. Genesis of late Early Cretaceous high-silica rhyolites in eastern Zhejiang Province, Southeast China: A crystal mush origin with mantle input[J]. *Lithos*, 296~299: 482~495.
- Zhang Qi. 2013. The criteria and discrimination for A-type granites: A reply to the question put forward by Wang Yang and some other persons for A-type granite: What is the essence? [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(2): 267~274 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, *et al.* 2007. Are discrimination diagrams always indicative of correct tectonic settings of granites? Some crucial questions on granite study (3) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2 683~2 698 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Ran Hao, Li Chengdong. 2012. A-type granite: what is the essence? [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 621~626 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 136(2): 177~202.
- Zhao Guangtao, Wang Dezi and Cao Qinchun. 1997. The geochemistry and genesis of the Laoshan granitoids, Shandong Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 5: 1~15 (in Chinese).
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, *et al.* 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *p-T* path constraints and tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 107(1-2): 45~73.
- Zhao G T, Wang D Z, Cao Q C, *et al.* 1998. Thermal evolution and its significance of I-A type granitoid complex[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 41(5): 529~536.
- Zhao Z F and Zheng Y F. 2009. Remelting of subducted continental lithosphere: Petrogenesis of Mesozoic magmatic rocks in the Dabie-Sulu

- orogenic belt[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 52(9): 1 295~1 318.
- Zhao Z F, Zheng Y F, Chen Y X, *et al.* 2017. Partial melting of subducted continental crust: Geochemical evidence from synexhumation granite in the Sulu orogen[J]. Geological Society of America Bulletin, 129: 1 692~1 707.
- Zheng J P. 2009. Comparison of mantle-derived materials from different spatiotemporal settings: Implications for destructive and accretional processes of the North China Craton [J]. Chinese Science Bulletin, 54(19): 3 397.
- Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, *et al.* 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China Block: Significance for lithosphere evolution [J]. Lithos, 57(1): 43~66.
- Zheng Yongfei, Xu Zheng, Zhao Zifu, *et al.* 2018. Mesozoic mafic magmatism in North China: Implications for thinning and destruction of cratonic lithosphere [J]. Science China Earth Sciences, 61: 353~383 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 部雪娇, 韩宗珠, 翁立猛, 等. 2021. 华北东部青岛地区煌斑岩岩石地球化学特征与成因[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 51(2): 69~82.
- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 等. 2015b. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换[J]. 地质论评, 61(3): 473~484.
- 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 等. 2015a. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议[J]. 地质论评, 61(4): 717~734.
- 管琪, 朱弟成, 赵志丹, 等. 2010. 西藏南部冈底斯带东段晚白垩世埃达克岩: 新特提斯洋俯冲的产物? [J]. 岩石学报, 26(7): 2 165~2 179.
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 等. 2005. 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, 21(4): 1 281~1 301.
- 侯可军, 李延河, 田有荣, 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481~492.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10): 2 595~2 604.
- 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 等. 2003. A 型岩套的分类、判别标志和成因[J]. 高校地质学报, 4: 573~591.
- 刘瑞杨, 周瑶琪, 周腾飞, 等. 2023. 青岛大珠山高分异花岗岩地球化学特征与含矿性分析[J]. 地质论评, 69(1): 179~198.
- 赛盛勋, 赵天明, 王中亮, 等. 2016. 玲珑黑云母花岗岩成因: 矿物学特征约束[J]. 岩石学报, 32(8): 2 477~2 493.
- 陶有兵, 王来明, 黄永波, 等. 2021. 胶东地区早白垩世崂山期花岗岩[J]. 山东国土资源, 37(10): 13~22.
- 王斌, 宋明春, 霍光, 等. 2021. 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, 40(2): 288~320.
- 王栋, 王天齐, 李红艳. 2023. 胶东崂山早白垩世 A 型花岗岩成因及对区域构造演化的意义[J]. 岩石学报, 39(2): 317~339.
- 王立功, 李秀章, 于晓卫, 等. 2022. 胶东大泽山、天柱山花岗岩岩石成因和构造背景: 地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Lu-Hf 同位素约束[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 52(3): 879~898.
- 王强, 赵振华, 熊小林. 2000. 桐柏一大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定[J]. 岩石矿物学杂志, 19(4): 297~306.
- 王世进, 万渝生, 王伟, 等. 2010. 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, 26(10): 1~6.
- 汪洋, 焦永玲, 仝立华, 等. 2013. 再论 A 型花岗岩的实质——与张旗先生等商榷[J]. 岩石矿物学杂志, 32(2): 260~266.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 吴福元, 孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报, 29(4): 313~318.
- 吴福元, 杨进辉, 张艳斌, 等. 2006. 辽西东南部中生代花岗岩时代[J]. 岩石学报, 22(2): 315~325.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1 589~1 604.
- 徐洪林, 张德全, 孙桂英. 1997. 胶东昆嵛山花岗岩的特征、成因及其与金矿的关系[J]. 岩石矿物学杂志, 16(2): 131~143.
- 翟明国. 2017. 花岗岩: 大陆地质研究的突破口以及若干关键科学问题——“岩石学报”花岗岩专辑代序[J]. 岩石学报, 33(5): 1 369~1 380.
- 赵广涛, 王德滋, 曹钦臣. 1997. 崂山花岗岩岩石地球化学与成因[J]. 高校地质学报, 5: 1~15.
- 赵广涛, 王德滋, 曹钦臣, 等. 1998. I-A 型复合花岗岩体的热演化及其意义——以崂山花岗岩体为例[J]. 中国科学(D 辑), 28: 296~302.
- 张旗. 2013. A 型花岗岩的标志和判别——兼答汪洋等对“A 型花岗岩的实质是什么”的质疑[J]. 岩石矿物学杂志, 32(2): 267~274.
- 张旗, 潘国强, 李承东, 等. 2007. 花岗岩构造环境问题: 关于花岗岩研究的思考之三[J]. 岩石学报, 23(11): 2 683~2 698.
- 张旗, 冉峰, 李承东. 2012. A 型花岗岩的实质是什么? [J]. 岩石矿物学杂志, 31(4): 621~626.
- 郑永飞, 徐峥, 赵子福, 等. 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏[J]. 中国科学: 地球科学, 48: 379~414.