

引用格式:冯乔,徐子苏,张耀,等.青岛胶南隆起带小珠山早白垩世花岗岩锆石 U-Pb 年代学及胶东半岛中生代花岗岩成因初探[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(2):1-13.

FENG Qiao, XU Zisu, ZHANG Yao, et al. Zircon U-Pb geochronology of the Early Cretaceous Xiaozhushan granite in Qingdao Jiaonan uplift and tectonic evolution of Mesozoic granite in Jiaodong Peninsula[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(2): 1-13.

青岛胶南隆起带小珠山早白垩世花岗岩锆石 U-Pb 年代学及胶东半岛中生代花岗岩成因初探

冯 乔¹, 徐子苏¹, 张 耀¹, 田方正¹, 朱 军², 沙 威²

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国石油天然气股份有限公司 青海油田公司勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202)

摘 要:青岛胶南隆起带小珠山花岗岩 SiO₂ 平均含量 70.21%, A/CNK 平均 1.13, 为强过铝质酸性岩体。岩体具有高钾特征, 显示中等程度的 LREE 富集、中等负 Eu 异常, Yb 平均含量 1.23×10^{-6} μg/g, Y 平均含量 0.18×10^{-6} μg/g, Sr 平均含量 21.93×10^{-6} μg/g, 为低 Sr 低 Yb 的喜马拉雅型花岗岩。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄加权平均结果为 123 Ma 和 122 Ma, 是早白垩世燕山晚期的产物。胶东半岛中生代花岗岩形成于 3 个时期并具有不同的形成机制: 晚三叠世(225~205 Ma)幔源型花岗岩, 是扬子板块向华北板块俯冲碰撞形成苏鲁超高压变质带, 地幔物质沿裂隙上涌, 富集地幔产生轻度熔融的结果; 晚侏罗世—早白垩世(160~135 Ma)地壳重熔型花岗岩, 源岩形成于 700~800 Ma 的扬子陆块, 由经历了三叠世超高压变质作用的扬子陆壳的新元古代物质熔融形成; 早白垩世(130~105 Ma)花岗岩形成于俯冲加厚深度不同的大陆地壳。胶北隆起区域的高 Mg 高 Sr 低 Yb 的埃达克型花岗岩形成深度较深(30~40 km), 可能由镁铁质下地壳的熔融分异形成; 胶南隆起区域的低 Mg 低 Sr 低 Yb 的喜马拉雅型花岗岩形成环境相对较浅(<30 km), 源岩可能来自含石榴石和斜长石的高压麻粒岩相的大陆地壳。

关键词:胶南隆起; 小珠山花岗岩; 锆石 U-Pb 定年; 早白垩世; 喜马拉雅型; 构造环境

中图分类号: P595

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2019)02-0001-13

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2019.02.001

Zircon U-Pb geochronology of the Early Cretaceous Xiaozhushan granite in Qingdao Jiaonan uplift and tectonic evolution of Mesozoic granite in Jiaodong Peninsula

FENG Qiao¹, XU Zisu¹, ZHANG Yao¹, TIAN Fangzheng¹, ZHU Jun², SHA Wei²

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Exploration and Development Research Institute of Qinghai Oil Field Company, PetroChina, Dunhuang, Gansu 736202, China)

Abstract: With the content of SiO₂ of 70.21% and the average A/CNK of 1.13, Xiaozhushan granite in Qingdao Jiaonan uplift is strongly peraluminous acid rock. With high-K characteristics, moderate LREE enrichment, moderate negative Eu anomaly, the average Yb content of 1.23×10^{-6} μg/g, the average Y content of 0.18×10^{-6} μg/g,

收稿日期: 2018-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41428201)

作者简介: 冯 乔(1963—), 男, 四川达州人, 教授, 博士, 主要从事石油地质和地球化学方面的研究。E-mail: 342853438@qq.com

徐子苏(1990—), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事地球化学方面的研究, 本文通信作者。

E-mail: lunaxzs@163.com

and the average Sr content of $21.93 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$, the rock belongs to the Himalaya type with low Sr and Yb. The geochemistry LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows that the Xiaozhushan granite formed in the Early Cretaceous Epoch (aged 122 Ma and 123 Ma). The Mesozoic granite of Jiaodong Peninsula formed during three different periods with different formation mechanisms. The Late Triassic (225-205 Ma) mantle-derived granites formed as a result of the mild fusion of mantle substance upswelling along the fracture of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt when Yangtze Plate and North China Plate collided with each other. The Late Jurassic-Early Cretaceous (160-135 Ma) heavy fusion crustal granites, whose source rock is the Yangtze Plate aged 700-800 Ma, formed as a result of fusion Neoproterozoic substance of the Yangtze Plate crust after experiencing Triassic ultrahigh-pressure metamorphism. The Early Cretaceous (130-105 Ma) granites formed in crust with different intensified diving depth. The Adak granite with high Mg, high Sr and low Yb content in Jiaobei uplift area formed in greater depth (30-40 km), possibly as a result of the lower crust of the mafic iron. The Himalayan granite with low Mg, low Sr and low Yb content in the Jiaonan uplift area formed in a relatively shallower environment (<30 km) and its source rock might be the crust of high-pressure granulite facies with the content of garnet and anorthose.

Key words: Jiaonan uplift; Xiaozhushan granite; Zircon U-Pb chronology; Early Cretaceous; Himalaya type; tectonic environment

近年诸多研究成果表明华北克拉通东部在显生宙晚三叠世至白垩纪重新开始活动,胶东半岛发育大规模的中生代岩体^[1]。这些岩体以硅含量较高的酸性岩为主,伴生少量基性侵入岩。以往对华北东部中生代岩石圈地球化学及年代学研究大多集中于胶北隆起和威海-乳山-荣成地区的超高压地体,如玲珑花岗岩体(153~160 Ma)、郭家岭花岗岩体(130±3 Ma)、伟德山岩体(108±2 Ma)^[2]、三佛山花岗岩体(112±2 Ma)等以及苏鲁造山带与秦岭大别造山带相交地带,如大店岩体(123 Ma)、五莲山岩体(116 Ma)^[3]。对苏鲁造山带中南部胶南隆起区花岗岩岩体的研究较少。本文通过对小珠山花岗岩体的地球化学和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究,确定其岩体类型、岩浆侵入时代,并结合前人早白垩世侵位岩体的研究成果,分析早白垩世花岗岩体形成的物质来源、源岩环境和地球动力学背景,为研究苏鲁超高压变质带中生代岩石圈演化和板块运动提供更多基础资料。

1 区域地质背景

小珠山花岗岩位于中国东部苏鲁造山带-大别缝合带东延部分的胶南隆起北部,与五莲-青岛断裂和胶莱盆地相邻,其地理位置位于青岛市胶州湾南西,为中生代燕山晚期酸性侵入花岗岩体(图1)。研究区酸性花岗岩体主要由中细粒二长花岗岩和石英二长岩组成,呈岩基状产出。受区域 NEE 和 NE 断裂构造控制,呈 NE 向展布。花岗岩体的围岩为晋宁期新元古代片麻状二长花岗岩,呈岩基与岩株状产出,受韧性剪切带改造,表现出不同程度的糜棱岩化,主要由同位素年龄 881 Ma 的塔山超单元和同位素年龄 804 Ma 的大顶子超单元组成。

2 岩相学特征及样品描述

研究区小珠山花岗岩岩体出露面积约 100 km²,用于测年及主量、微量元素研究的花岗岩样品采自东洞门村地表出露的小珠山花岗岩。岩体为中细粒黑云母石英二长花岗岩,呈岩基状产出,浅肉红色。显微镜下观察具中细粒花岗结构,长石发育条纹结构,块状构造。主要矿物包括碱性长石(35%~40%),分为条纹长石和微斜长石;斜长石(10%~15%),半自形-自形板状(1.5~3 mm),发育聚片双晶;石英(30%),它形粒状,分布于长石粒间,粒度 0.7~2 mm 以及少量黑云母(3%~5%)(图2)。

3 测试方法

小珠山花岗岩用于全岩主量元素、微量元素及稀土元素测定的 5 个岩石样品,成分较均一,主量、微量元素委托河北省廊坊市中铁物探勘察有限公司测试。主量元素运用容量法,由波长色散 X 荧光光谱仪测定,

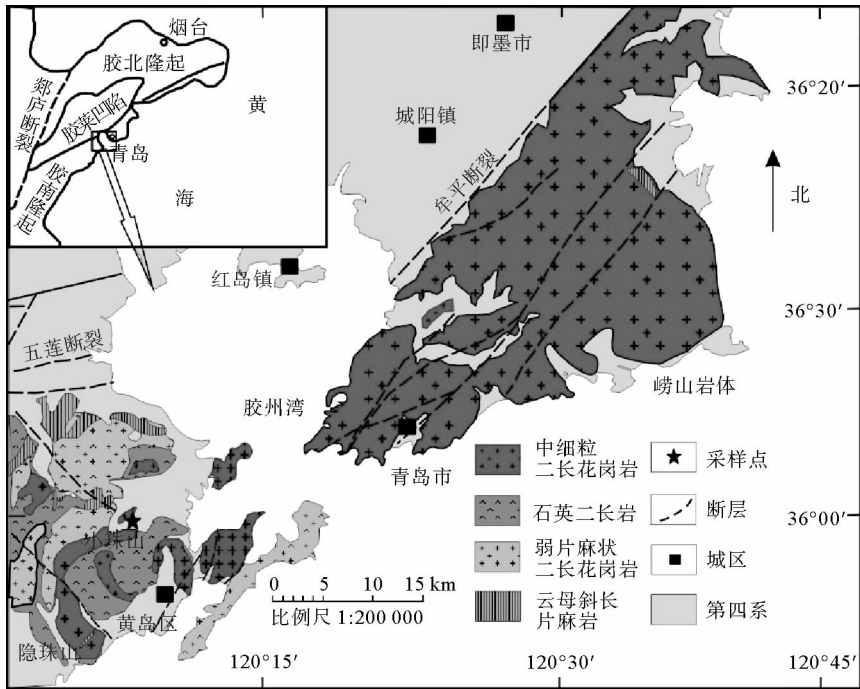
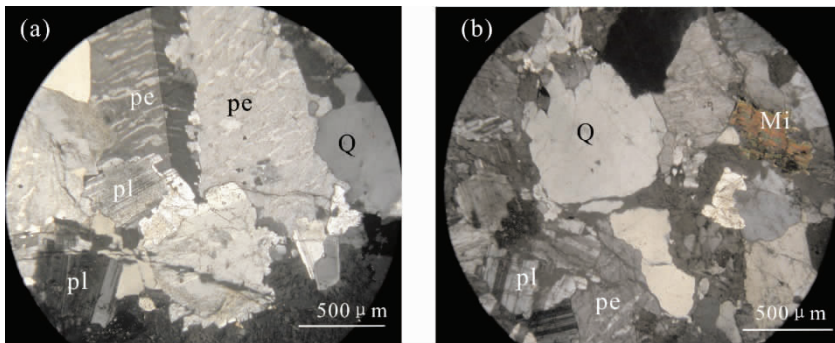


图 1 小珠山花岗岩地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the Xiaozhushan granite



(a) 小珠山花岗岩的条纹结构(正交偏光)

(b) 小珠山花岗岩镜下照片(正交偏光)

Pe—条纹长石; Q—石英; Pl—斜长石; Bi—黑云母

图 2 小珠山花岗岩显微照片

Fig. 2 Microphoto graphs of Xiaozhushan granite

型号 ARL AdvantXP+, 检测依据为 GB/T 14506. 28—2010 硅酸盐岩石化学分析方法, 分别测定主次成分量和氧化亚铁量。微量元素运用等离子体质谱仪, 分析精度 $\leq 1\%$, 结果见表 1。单颗粒锆石 U-Pb 定年在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 锆石分选采用淘洗、磁选和重液法, 阴极发光图像用于研究锆石内部结构, 在激光等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪上分析 U-Pb 同位素。激光剥蚀系统为德国公司生产的 Geo Las200M, 激光器由德国 Lambda Physik 公司生产(波长 193 nm 工作物质 Ar F-excimer)。激光剥蚀利用氦气为载气, 斑束孔径 20 μm , 剥蚀深度 20~40 μm , 激光频率为 10 Hz, 能量为 0.032~0.036 J, 利用标样 91500 对同位素组成进行外标校正, LA-ICP-MS 具体分析方法参见文献[4]。

4 测试结果

4.1 主量元素、微量元素特征

4.1.1 主量元素

小珠山花岗岩 SiO₂ 质量含量为 69.26%~70.62%(表 1),平均 70.21%;K₂O+Na₂O 含量 9.68%~10.93%,平均 10.50%;K₂O/Na₂O=1.18~1.02,平均 1.10。K₂O 含量 5.00%~5.79%,平均 5.52%,K₂O 含量较高;Al₂O₃ 含量 17.39%~16.05%;ACNK 为 1.09~1.15,平均 1.13,为过铝质;MgO 含量 0.26%~0.48%,平均 0.37%;CaO 含量 0.22%~0.44%,平均 0.31%;TiO₂ 含量 0.16%~0.27%,平均 0.20%,MgO、CaO、TiO₂ 含量较低。在各类组合参数图解中(图 3),小珠山花岗岩属于过铝质钙碱性系列,位于钾玄岩与高钾系列、碱性与亚碱性的过渡区域。

表 1 小珠山岩体花岗岩主量元素含量
Tab.1 Contents of major elements of the Xiaozhushan granite

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	FeO	Σ	A/CNK
DMS01	69.26	17.25	1.22	0.37	0.37	4.89	5.79	0.03	0.23	0.004	0.48	0.12	100.02	1.15
DMS02	69.54	17.39	0.97	0.39	0.26	5.07	5.72	0.02	0.17	0.008	0.38	0.10	100.01	1.16
DMS03	70.34	16.62	0.90	0.26	0.28	5.11	5.82	0.02	0.16	0.011	0.34	0.08	99.98	1.09
DMS04	71.30	16.05	1.09	0.38	0.22	4.97	5.26	0.03	0.20	0.011	0.39	0.08	99.98	1.12
DMS05	70.62	16.32	1.45	0.48	0.45	4.86	5.00	0.05	0.27	0.017	0.32	0.36	100.21	1.15

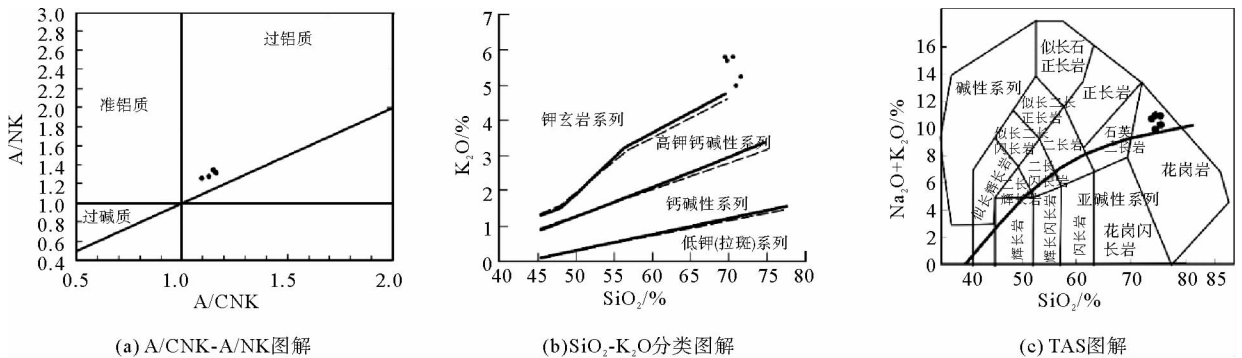


图 3 小珠山花岗岩岩石类型组合图

Fig. 3 Series diagram of rock types of the Xiaozhushan granite

4.1.2 微量元素

小珠山花岗岩所有样品具有相似的稀土配分模式(图 4),稀土总量 $79.8 \times 10^{-6} \sim 174.9 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$,平均 $111 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$ (表 2)。LREE/HREE 为 11.01~17.77, Yb 含量为 $0.86 \times 10^{-6} \sim 2.16 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 9.47~18.27 $\mu\text{g/g}$,属于相对平缓的 REE 配分模式,轻稀土富集重稀土亏损。 δEu 为 0.44~0.61,平均为 0.49,具有明显的中等负 Eu 异常。微量元素配分模式图(球粒陨石标准化数据引自文献[5])与原始地幔标准化元素蛛网图(原始地幔标准化数据引自文献[6])具有一致性(图 4、5),显示 Ba、Sr、P、Eu、Ti 和 Y 为负异常,Pb 为正异常。其中,Sr 为 $11.13 \times 10^{-6} \sim 46.65 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$,平均 $21.93 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$; Y 为 $0.12 \times 10^{-6} \sim 0.32 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$,平均 $0.18 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$; Yb 为 $0.86 \times 10^{-6} \sim 2.16 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$,平均 $1.23 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$ 。

小珠山岩体 La/Nb 的质量分数比值为 1.41~3.09,平均为 2.51;Th/Nb 质量分数比值为 0.40~0.73,平均 0.54;Th/La 质量分数比值为 0.16~0.28,平均 0.22。以上三比值略高于或等于大陆地壳平均值(La/Nb 为 2.2;Th/Nb 为 0.44;Th/La 为 0.22),显示小珠山花岗岩具明显的壳源特征[7]。岩体显示中等程度的 LREE 富集、明显的负 Eu 异常和较平坦的 HREE 配分模式。Yb 含量大多低于 $2 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$,Sr 含量均低于 $100 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$,显示出低 Sr 低 Yb 的特点,可能形成于中等成岩压力下。花岗岩贫 Yb 表明源区有石

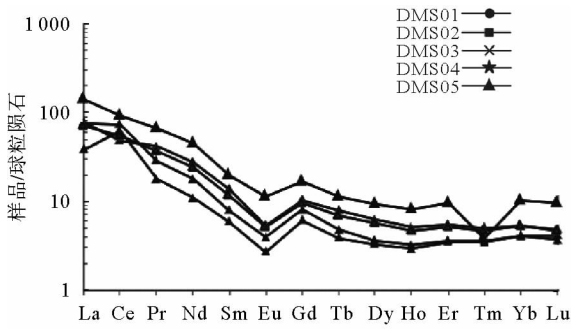


图 4 小珠山花岗岩的稀土元素配分曲线图

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of the Xiaozhushan granite

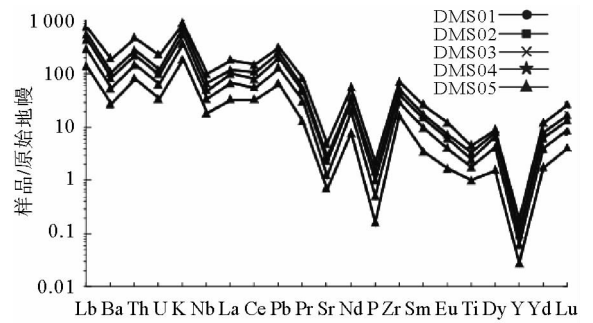


图 5 小珠山花岗岩微量元素配分曲线图

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams of Xiaozhushan granite

表 2 小珠山岩体花岗岩微量元素含量

Tab. 2 Contents of trace elements of the Xiaozhushan granite

 $\times 10^{-6} \mu\text{g/g}$

	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Nb	Ba	La
DMS01	2.31	6.86	1.46	0.42	0.55	12.61	15.40	15.50	90.80	15.00	0.13	13.40	193.00	23.60
DMS02	2.04	5.24	2.07	0.25	0.84	12.83	13.30	16.40	97.00	13.80	0.16	11.60	197.00	24.60
DMS03	2.37	4.73	2.03	0.33	0.86	13.51	17.40	17.10	100.00	23.30	0.15	11.40	219.00	22.80
DMS04	2.18	5.31	2.39	0.26	1.91	13.82	21.40	16.60	75.20	11.10	0.12	12.60	151.00	12.20
DMS05	2.14	10.6	1.72	0.77	1.01	14.40	30.40	19.90	131.00	46.60	0.32	24.80	619.00	44.70
	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf
DMS01	60.50	3.54	10.80	1.62	0.29	2.11	0.23	1.18	0.23	0.77	0.12	0.87	0.13	5.17
DMS02	39.70	5.09	16.80	2.81	0.40	2.73	0.38	2.02	0.37	1.19	0.16	1.12	0.16	4.16
DMS03	44.80	4.50	14.40	2.40	0.38	2.50	0.34	1.82	0.34	1.10	0.15	1.12	0.15	3.84
DMS04	52.30	2.23	6.87	1.13	0.20	1.60	0.19	1.04	0.21	0.74	0.11	0.86	0.12	3.31
DMS05	77.00	8.21	26.90	3.99	0.83	4.34	0.55	2.99	0.59	2.01	0.29	2.16	0.32	4.80
	Ta	Pb	Th	U	Zr	ΣREE	δEu	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	La/Nb	Th/La	Zr/Hf	Zr/Y	Sr/Yb
DMS01	0.92	18.92	7.27	0.73	191.00	106.02	0.48	19.48	9.39	2.55	0.21	36.85	1 421.67	17.18
DMS02	0.87	18.14	5.87	0.66	150.00	97.68	0.43	15.79	5.66	3.09	0.16	35.98	952.23	12.27
DMS03	0.74	19.41	6.10	0.70	138.00	96.85	0.48	14.59	6.12	2.92	0.18	35.88	913.25	20.84
DMS04	0.81	16.15	5.05	0.51	121.00	79.95	0.45	10.16	6.97	1.41	0.28	36.69	1 020.17	12.83
DMS05	1.39	17.23	18.1	2.39	224.00	175.22	0.61	14.89	7.24	2.63	0.28	46.55	709.84	21.59

榴子石残留,贫 Sr 加之 Eu 负异常表明源区有斜长石残留,小珠山花岗岩源区残留物组成可能为石榴子石和斜长石,因此小珠山岩体为形成于中等深度的喜马拉雅型花岗岩^[8]。但小珠山岩体的加厚地壳与喜马拉雅山脉的地壳厚度与规模存在差别,现代喜马拉雅地壳是由印度板块俯冲于亚洲板块之下的大型陆-陆俯冲形成,厚度与规模可能远大于由扬子板块俯冲于华北板块之下形成的胶南隆起。

4.2 小珠山岩体锆石 U-Pb 年龄

小珠山岩体样品(DMS06 和 DMS07)分别选取 20 和 21 粒锆石进行 LA-ICP-MS 法 U-Pb 定年分析,两样品共获得 30 个有效数据。样品中锆石主要为短柱状,其余为不规则柱状或粒状,无色透明,自形到半自形状,锆石长径 65~120 μm ,长宽比为 1.5:1~2:1。阴极发光图像显示具有岩浆韵律震荡环带(图 6),为岩浆结晶锆石。

样品 DMS06 中锆石的 U、Th 含量在 $162 \times 10^{-6} \sim 2 506 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$ 和 $496 \times 10^{-6} \sim 6 646 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$,

Th/U 1.48~2.27。样品 DMS07 中锆石的 U、Th 含量 $162 \times 10^{-6} \sim 2\,506 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$ 和 $496 \times 10^{-6} \sim 6\,646 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$, Th/U 介于 1.44~2.44 之间(表 3),符合岩浆锆石 Th/U 比值 >0.4 的特征。样品 DMS06 在谐和曲线上 14 个数据点的加权平均年龄为 123 Ma(图 7);样品 DMS07 谐和曲线上 16 个数据点的加权平均年龄为 122 Ma,表明小珠山花岗岩的侵位年龄为早白垩世晚燕山期(图 8)。

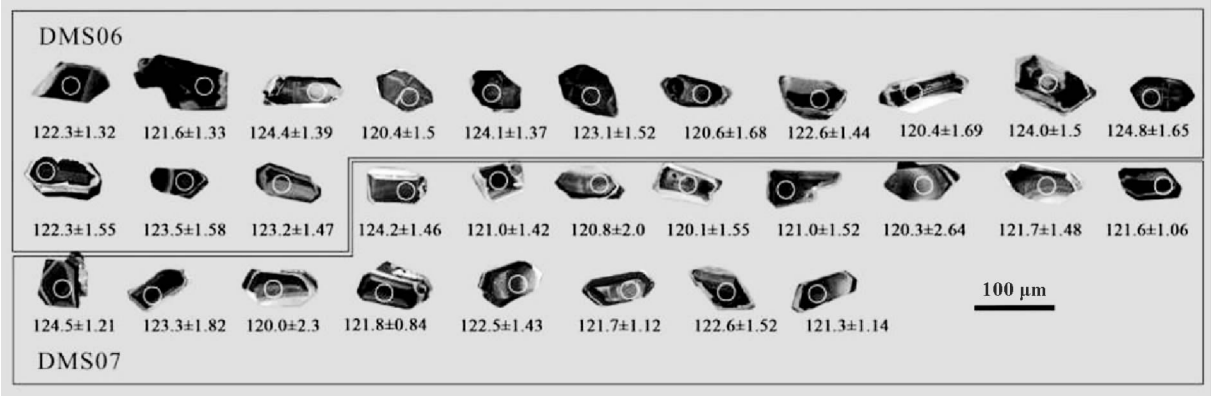


图 6 小珠山岩体中细粒二长花岗岩代表性锆石阴极发光图像

Fig. 6 Representative CL images of zircons for medium-to fine grained monzogranites from the Xiaozhushan granite

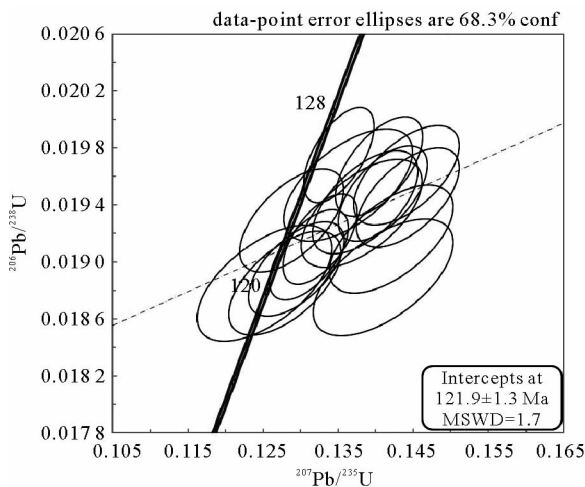
表 3 小珠山中细粒似斑状二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄数据

Tab. 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for medium-to fine grained monzogranites from the Xiaozhushan granite

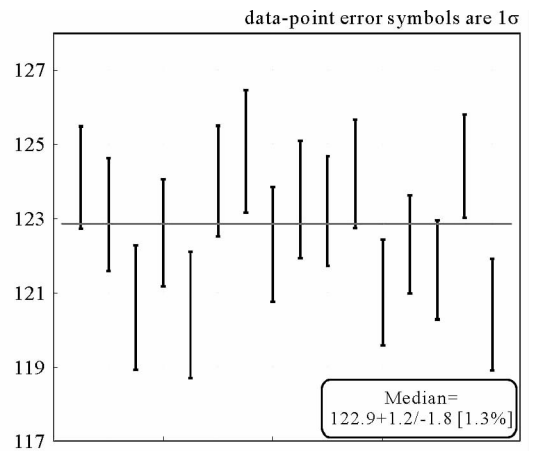
测点号	含量/ $(\times 10^{-6} \mu\text{g/g})$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Th	U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ
DMS06-01	620.41	403.99	1.54	0.050 27	0.001 58	0.132 59	0.003 25	0.019 16	0.000 21	208	71.09	126	2.91	122	1.32
DMS06-03	723.20	425.56	1.70	0.050 00	0.001 65	0.131 10	0.003 47	0.019 05	0.000 21	195	74.99	125	3.12	122	1.33
DMS06-04	481.52	326.35	1.48	0.052 58	0.001 79	0.140 96	0.003 91	0.019 48	0.000 22	311	75.80	134	3.48	124	1.39
DMS06-05	496.41	343.69	1.44	0.049 31	0.002 15	0.127 90	0.004 93	0.018 85	0.000 24	163	99.07	122	4.44	120	1.50
DMS06-07	3 572.18	1 742.05	2.05	0.049 59	0.001 46	0.135 10	0.003 11	0.019 75	0.000 22	176	67.26	129	2.78	124	1.37
DMS06-08	1 868.11	1 254.16	1.49	0.048 40	0.001 95	0.128 79	0.004 56	0.019 29	0.000 24	119	92.21	123	4.10	123	1.52
DMS06-09	1 917.89	1 202.09	1.60	0.054 13	0.002 60	0.141 03	0.006 14	0.018 89	0.000 27	376	103.96	134	5.47	121	1.68
DMS06-10	4 147.49	1 829.16	2.27	0.051 76	0.001 72	0.140 45	0.003 84	0.019 67	0.000 23	275	74.16	133	3.42	123	1.44
DMS06-13	3 007.85	1 331.39	2.26	0.048 16	0.002 48	0.125 22	0.005 92	0.018 85	0.000 27	107	117.49	120	5.34	120	1.69
DMS06-14	1 772.80	999.52	1.77	0.051 75	0.002 00	0.138 61	0.004 64	0.019 42	0.000 24	274	86.26	132	4.14	124	1.50
DMS06-16	1 628.29	851.86	1.91	0.050 59	0.002 34	0.136 31	0.005 68	0.019 54	0.000 26	222	103.73	130	5.08	125	1.65
DM06-17	525.32	357.33	1.47	0.053 81	0.002 32	0.142 10	0.005 42	0.019 16	0.000 25	363	94.05	135	4.82	122	1.55
DMS06-19	1 016.86	816.00	1.25	0.051 83	0.002 25	0.138 15	0.005 32	0.019 34	0.000 25	278	96.43	131	4.75	124	1.58
DMS06-20	495.78	397.95	1.25	0.053 32	0.002 01	0.144 10	0.004 64	0.019 61	0.000 23	342	83.04	137	4.12	123	1.47
DMS06-21	593.65	370.92	1.60	0.053 82	0.001 99	0.144 28	0.004 53	0.019 45	0.000 23	363	81.25	137	4.02	124	1.46
DMS06-23	1 304.86	770.74	1.69	0.049 59	0.001 88	0.129 45	0.004 20	0.018 95	0.000 22	176	86.27	124	3.77	121	1.42
DMS07-01	701.40	287.93	2.44	0.068 55	0.004 73	0.178 82	0.011 93	0.018 92	0.000 32	885	136.58	167	10.28	121	2.00
DMS07-02	663.88	447.23	1.48	0.049 80	0.003 18	0.129 21	0.008 02	0.018 81	0.000 25	186	142.11	123	7.21	120	1.55
DMS07-03	608.41	376.98	1.61	0.058 10	0.003 22	0.151 79	0.008 11	0.018 94	0.000 24	5 339	117.34	144	7.15	121	1.52
DMS07-05	361.39	162.08	2.23	0.052 34	0.006 66	0.135 93	0.017 02	0.018 83	0.000 42	300	266.74	130	15.22	120	2.64

续表 3

测点号	含量/($\times 10^{-6}$ $\mu\text{g/g}$)		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
DMS07-06	1 252.19	620.12	2.02	0.078 98	0.003 51	0.207 60	0.008 73	0.019 06	0.000 23	1 172	85.45	192	7.34	122	1.48
DMS07-07	936.63	531.33	1.76	0.074 88	0.002 31	0.196 76	0.005 62	0.019 05	0.000 17	1 065	60.90	182	4.77	122	1.06
DMS07-08	1 018.51	499.52	2.04	0.059 88	0.002 36	0.161 06	0.006 03	0.019 50	0.000 19	599	83.20	152	5.27	125	1.21
DMS07-09	508.45	315.54	1.61	0.053 61	0.003 90	0.142 77	0.010 14	0.019 31	0.000 29	355	156.35	136	9.01	123	1.82
DMS07-11	1251.63	848.58	1.47	0.065 08	0.005 38	0.168 67	0.013 55	0.018 79	0.000 36	777	164.96	158	11.77	120	2.30
DMS07-18	2 341.61	1 273.03	1.84	0.087 11	0.001 84	0.229 03	0.004 23	0.019 07	0.000 13	1 363	40.19	209	3.50	122	0.84
DMS07-19	864.70	598.74	1.44	0.068 53	0.003 07	0.181 27	0.007 75	0.019 19	0.000 23	885	90.01	169	6.66	123	1.43
DMS07-20	2 290.04	1 043.49	2.19	0.057 00	0.002 11	0.149 73	0.005 27	0.019 06	0.000 18	491	80.34	142	4.65	122	1.12
DMS07-21	412.32	244.15	1.69	0.052 86	0.003 20	0.139 85	0.008 24	0.019 19	0.000 24	323	131.69	133	7.34	123	1.52
DMS07-22	2 016.34	921.19	2.19	0.058 95	0.002 17	0.154 32	0.005 38	0.018 99	0.000 18	565	78.19	146	4.74	121	1.14



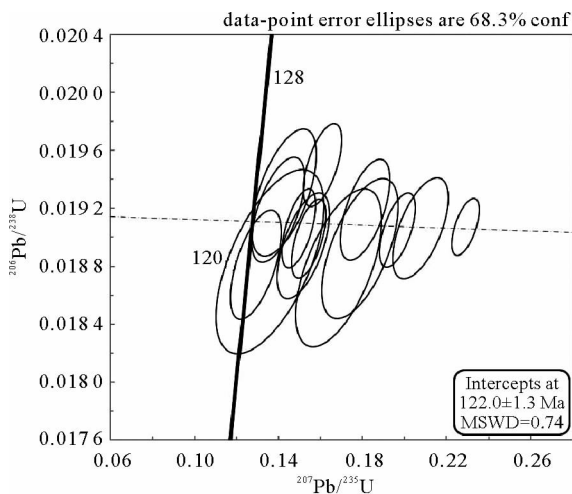
(a) 锆石U-Pb年龄谐和图



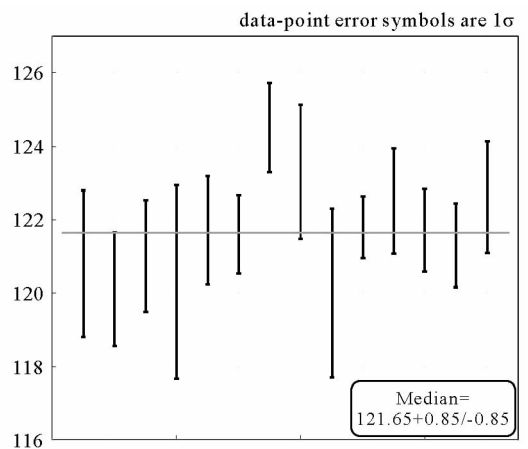
(b) 加权平均年龄图

图 7 小珠山岩体样品 DMS06 锆石年龄

Fig. 7 U-Pb concordia diagram and weighted mean age for samples DMS06 from the Xiaozhushan granite



(a) 锆石U-Pb年龄谐和图



(b) 加权平均年龄图

图 8 小珠山岩体样品 DMS07 锆石年龄

Fig. 8 U-Pb concordia diagram and weighted mean age for samples DMS07 from the Xiaozhushan granite

5 胶东地区花岗质侵入岩年代学探讨

郯庐断裂以东的胶东地区发育大面积的中生代花岗岩。通过对这些岩体的年代学研究成果统计分析,认为胶东地区中生代花岗岩形成于3个时期:①晚三叠世(223~205 Ma)印支期花岗岩、②晚侏罗世—早白垩世(160~135 Ma)早燕山期花岗岩和③早白垩世(130~105 Ma)晚燕山期花岗岩(图9)。3期花岗岩的分布具有明显的区域性:晚三叠世花岗岩集中分布于胶东半岛的东南角,以甲子山岩体、槎山岩体和邢家山岩体为代表;晚侏罗世—早白垩世花岗岩主要分布于东西向延伸的胶北隆起带中,以玲珑、昆嵛山、垛山等岩体为代表;早白垩世花岗岩主要分布于胶莱盆地南东的胶南隆起区,以崂山、七宝山、五莲山等岩体为代表,另有少部分夹杂于胶北隆起带(图10)。

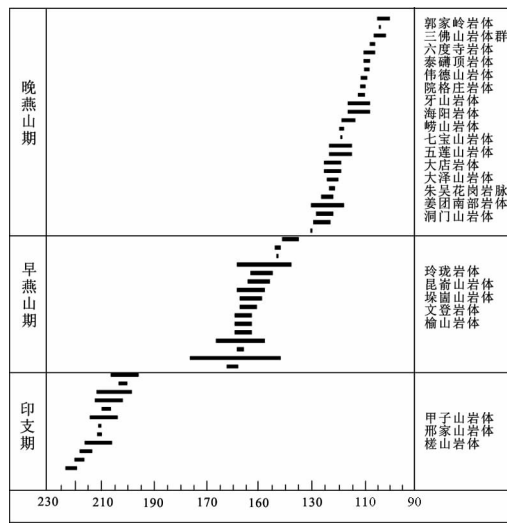


图9 胶东半岛中生代侵入岩年龄统计图

Fig. 9 Plotting of isotope ages of Mesozoic intrusive rocks in the Jiaodong Peninsula

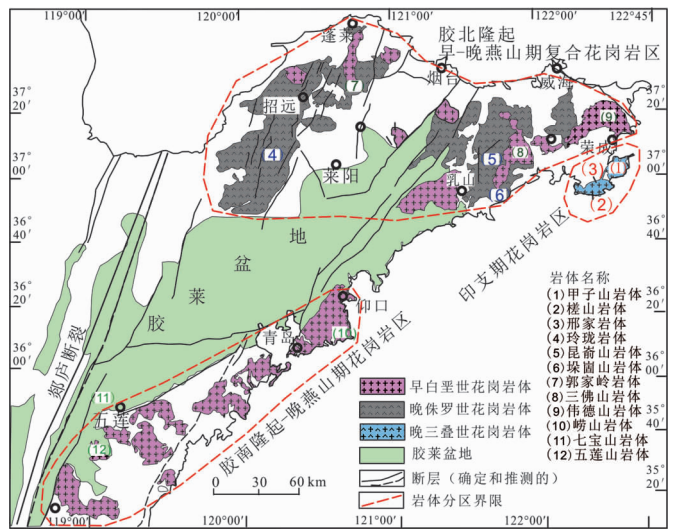


图10 胶东半岛中生代花岗岩体年代分布图

Fig. 10 The distribution of Mesozoic granite rocks in the Jiaodong Peninsula

3期中生代花岗岩在地球化学组成上存在明显差异。 K_2O-SiO_2 图显示,晚三叠世印支期花岗岩体多集中于高钾的钾玄岩系列,晚侏罗世—早白垩世早燕山期花岗岩多属钙碱系列,早白垩世晚燕山期花岗岩体主要表现出高钾钙碱性系列的特征,甚至部分样品落入更富钾的钾玄岩系列(图11)。

5.1 印支期晚三叠世岩体

晚三叠世岩体位于胶东半岛东南角(图10),侵位于苏鲁地块的TTG片麻岩中,北侧是荣成超高压地体。由老至新由邢家山黑云母辉长岩体、甲子山辉石正长岩体及槎山黑云母正

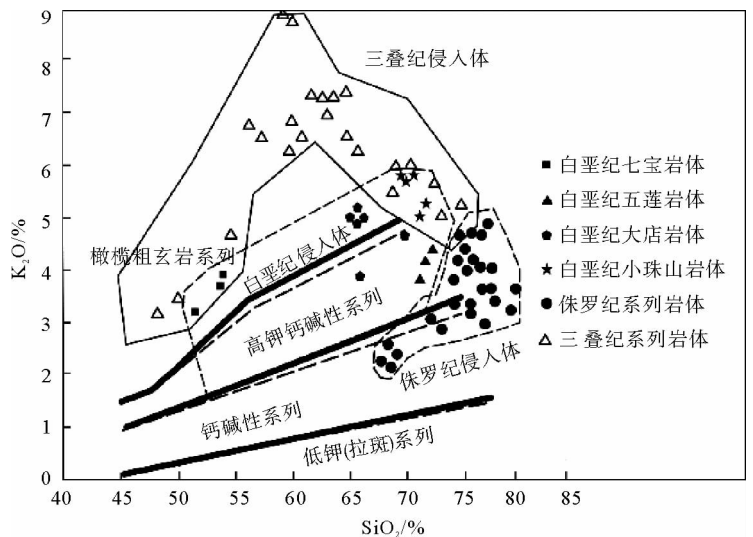


图11 胶东半岛中生代花岗岩 SiO_2-K_2O 图解

Fig. 11 K_2O-SiO_2 diagram of Mesozoic intrusive rocks in Jiaodong Peninsula

长花岗岩体组成,年代学研究显示晚三叠世花岗岩主要形成于 223~205 Ma(图 9)^[9]。

晚三叠世花岗岩在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解中均落入高钾橄榄玄粗岩系列, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 1.12~3.04,属于富钾系列侵入岩。当 SiO_2 含量低于 60% 时, K_2O 含量随 SiO_2 含量的增加而增加; SiO_2 含量高于 60% 时, K_2O 含量递减(图 11)。总体上看,自邢家山辉长岩、甲子山辉石正长岩到槎山正长花岗岩,随 SiO_2 的增加, TiO_2 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 MgO 、 CaO 、 MnO 、 Ba 、 Sr 与 SiO_2 成反比,Nb 与 Rb 与 SiO_2 成正比^[9]。胶东半岛晚三叠世岩体具有连续的主微量元素协同变化趋势,表明各岩体具有亲缘关系,可能来自相同的富集岩石圈地幔源区。最早熔出的是低 SiO_2 (48%~50%) 含量的基性邢家山碱性辉长岩体(225±2 Ma),推测它们可能是地幔部分熔融的产物^[10]。较晚熔出槎山岩体(205±5 Ma)表现出了更高的 SiO_2 含量,且从邢家山黑云母辉长岩到槎山正长花岗岩之间较大的年代差距表明两者可能不是同一岩浆的结晶分异产物。槎山岩体与白垩纪侵入岩体具有相似的地球化学特征,形成于与其他晚三叠世岩体不同的大地构造背景。

晚三叠世是扬子板块和华北板块碰撞最活跃时期,240~220 Ma 为秦岭-大别-苏鲁造山带的超高压变质时代,岩浆活动滞后于超高压变质作用约 5~25 Ma。因此推测胶东半岛印支期晚三叠世的幔源型花岗岩是在扬子板块向华北地块俯冲碰撞过程中,扬子板块发生了板片脱离(break-off),地幔岩浆沿裂隙上涌,并在不同阶段产生轻度熔融而形成。

5.2 早燕山期晚侏罗世—早白垩世花岗岩

晚侏罗世—早白垩世花岗岩体主要分布于胶莱盆地北部的胶北隆起区域,以玲珑、文登、昆崙山、垛崙山岩体为主,总体呈 EW 向展布,侵位于前寒武纪超高压片麻岩中并与早白垩世岩体呈穿插关系。岩性以花岗闪长岩、含石榴子石淡色花岗岩和黑云母二长花岗岩为主。SHRMIP、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等年代学数据表明这些岩体的形成时代为晚侏罗世—早白垩世(160~135 Ma)^[11-12]。

在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 分类图中,晚侏罗世—早白垩世花岗岩数据点集中于钙碱性系列,区别于高钾系列的早白垩世岩体(图 11)。垛崙山岩体普遍含有岩浆绿帘石,表明岩体可能来自于较深的基性下地壳,因此推测垛崙山岩体和昆崙山岩体由长英质陆壳部分熔融形成^[4]。胶北隆起的晚侏罗世—早白垩世岩体锆石中含有多种类多期次的继承核:玲珑岩体的继承锆石年龄多在 200~300 Ma;招远至莱州地区的花岗岩继承锆石平均年龄在 219 Ma;昆崙山岩体锆石核部出现两种继承锆石,继承岩浆锆石年龄在 700~800 Ma,继承变质锆石年龄在 200~300 Ma^[13]。这些岩体的继承锆石年龄表明,本区侏罗世岩体的源岩来自形成于 700~800 Ma 的扬子板块,岩浆岩源区由经历了三叠世超高压变质作用的扬子陆壳新元古代物质熔融形成。地球物理资料表明,140~125 Ma 古太平洋板块并不是向西俯冲插入亚州板块之下,而是向北东约 33° 方向扩张^[14],证明太平洋板块俯冲不是胶东半岛晚侏罗世—早白垩世花岗岩的形成原因。结合侏罗世岩浆锆石及其继承锆石的年龄特征,推测扬子陆块俯冲至华北陆块之下发生部分熔融,形成了胶东半岛晚侏罗世地壳重熔型花岗岩。

5.3 晚燕山期早白垩世花岗岩

早白垩世花岗岩在胶东半岛出露面积最广,包括零星分布的基性岩和大面积出露的中酸性岩。胶东半岛早白垩世岩体分布于两大区域:①胶北隆起区早—晚燕山期复合花岗岩区,由早白垩世岩体与晚侏罗世岩体穿插分布,早白垩世岩体以郭家岭、牙山、三佛山、伟德山为代表;②胶南隆起区晚燕山期花岗岩区,主要包括崂山、五莲山、小珠山等岩体(图 10)。研究区南东方向灵山岛早白垩世凝灰岩最小加权平均年龄在 103.8±1.4 Ma,物源应属晚燕山期早白垩世岩体中的喷出岩系列^[15]。以上年代学数据表明,胶东半岛的早白垩世岩体主要形成于 103~143 Ma,峰期在 115~130 Ma。地球化学数据表明早白垩世岩体主要属于高钾钙碱系列和更富钾的钾玄岩系列,表现出明显的高钾特征(图 11)。

6 早白垩世花岗岩体成因机制

6.1 早白垩世岩体形成的构造环境

选取胶北隆起的郭家岭岩体、三佛山岩体和胶南隆起的崂山岩体、小珠山岩体,根据其地球化学数据计算和分析,进一步解释胶东半岛中生代岩浆岩的成因。

Rb-(Y+Nb)图解中(图 12(a)),胶北隆起区的数据点几乎全部落入火山弧花岗岩区(VAG),说明其形成与俯冲作用有关,处于岛弧或大陆边缘弧环境中。胶南隆起区有部分数据点(崂山碱性花岗岩)位于板内花岗岩区(WPG),指示其形成于相对宁静的张性构造环境,说明胶南隆起区的部分花岗岩体的形成与裂谷环境和张裂环境有关。Rb/30-Hf-Ta×3 三角图解(图 12(b))中,胶北隆起区的数据点大多数落入火山弧花岗岩区;胶南隆起区的数据部分落入火山弧区,少部分落入碰撞后的构造伸展环境。总体上胶东半岛早白垩世花岗岩的形成更倾向于岛弧或大陆边缘弧环境。

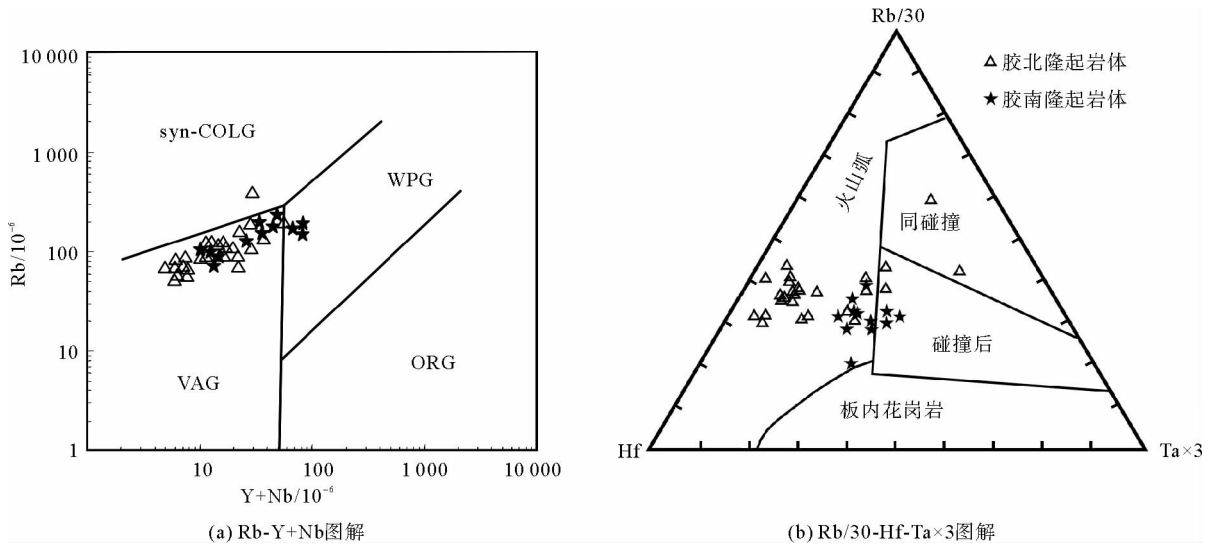
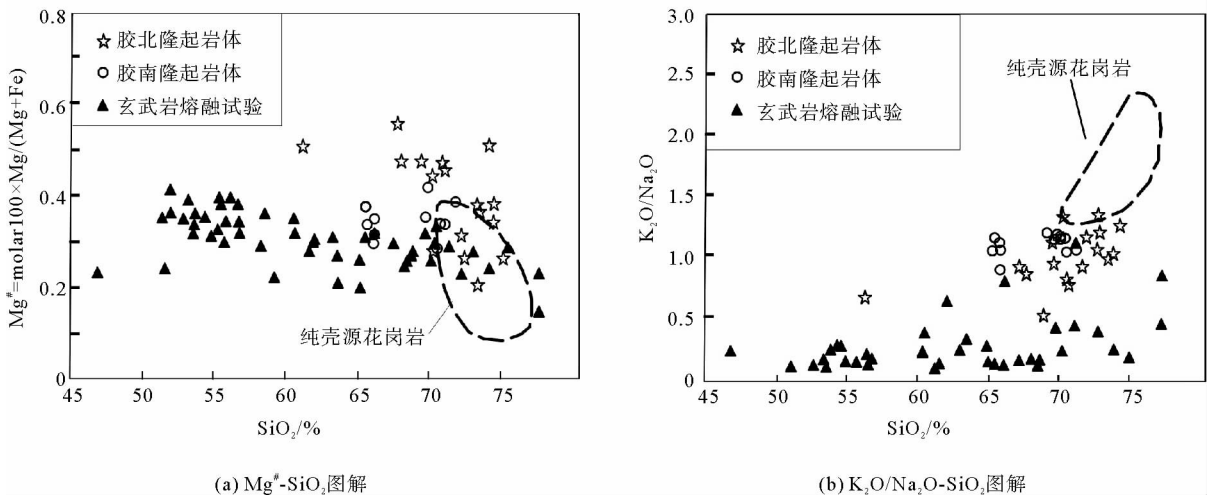


图 12 胶东半岛早白垩世花岗岩类型组合图^[2-11]

Fig. 12 Seires diagram of types of Early Cretaceous granite from Jiaodong peninsula

将胶东半岛早白垩世花岗岩主量与微量元素数据与玄武岩熔融试验熔体^[16]和基底片麻岩部分熔融形成的纯壳源花岗岩^[17]进行比较(图 13)。在同等 SiO₂ 含量的情况下,胶东半岛早白垩世花岗岩具有比玄武岩熔融试验熔体高得多的钾含量(K₂O/Na₂O 值在 0.8~1.5 之间,平均为 1.07)(图 13(b)),且低于纯壳源花岗岩的钾含量。花岗岩中的 Mg[#] 具有指示与地幔亲缘关系的作用^[18],胶南隆起区花岗岩的 Mg[#] 为



(a) Mg[#]-SiO₂图解

(b) K₂O/Na₂O-SiO₂图解

胶北隆起花岗岩样品据郭家岭岩体^[11]、三佛山岩体^[11],胶南隆起花岗岩样品据五莲岩体^[3]、小珠山岩体(本文数据)。对比数据为玄武岩熔融试验数据^[16]和纳米比亚基底片麻岩熔融成因纯壳源花岗岩^[17]

图 13 胶东半岛早白垩世花岗岩 Mg[#] 和 K²O/Na²O 图解

Fig. 13 Seires diagram of Mg[#] and K₂O/Na₂O vs. SiO₂ of Early Cretaceous granite from Jiaodong peninsula

11.7~41.9, 平均 31.2; 胶北隆起区的 $Mg^\#$ 为 16.5~55.9, 平均 45.2, 二者镁含量存在较大差异(图 13(a))。

胶北隆起区和胶南隆起区早白垩世花岗岩的 Yb 含量均较低, 其中胶北隆起区 Yb 含量平均为 $0.68 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$, 胶南隆起区 Yb 含量平均为 $1.77 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$; 两区 Sr 含量区别更大, 胶北隆起区花岗岩 Sr 含量较高, 平均为 $912 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$, 数据点均位于 $Sr=400 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$ 分界线上, 为高压下形成的高 Sr 低 Yb 的典型埃达克型花岗岩。胶南隆起区花岗岩 Sr 含量较低, 平均为 $216 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$, 数据点大多落于 $Sr=400 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$ 分界线以下, 为中等压力和深度下形成的低 Sr 低 Yb 含量的喜马拉雅型花岗岩体(图 14)。

6.2 早白垩世岩体的成因模式

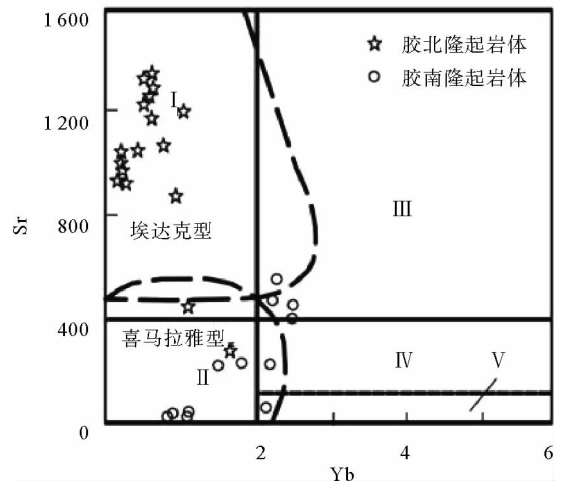
前人对于华北地区早白垩世花岗岩的形成机制主要有两种观点: 一种观点认为在古太平洋板块的俯冲条件下, 地幔物质上涌, 华北中生代岩浆岩主要形成于壳幔混合作用以及其后的分离结晶作用中^[11]; 另一种认为花岗岩岩浆是俯冲加厚大陆地壳部分熔融的结果, 基性的下地壳发生部分熔融, 源区残留石榴石, 熔体具有低的 Y 与 Yb, 高的 Sr 含量^[19]。

本研究认为胶东半岛早白垩世花岗岩的形成虽然由俯冲加厚的大陆地壳部分熔融产生, 但胶北隆起与胶南隆起两区的花岗岩具有不同的地球化学特征, 表明两者形成环境有较大差异。在 Rb-(Y+Nb) 图解和 Rb/30-Hf-Ta \times 3 三角图解中, 胶东半岛的早白垩世岩体数据大多集中于火山弧花岗岩区(VAG), 说明源区形成与俯冲作用有关, 处于岛弧或大陆边缘弧环境中。两区的花岗岩都具有高钾特征, K_2O/Na_2O 值平均为 1.07, 表明壳源物质参与了花岗岩的形成。采用花岗岩 Sr-Yb 分类图, 胶北隆起区岩体为高压下形成的高 Sr 低 Yb 的典型埃达克型花岗岩, 胶南隆起区岩体为中等压力与深度下形成的低 Sr 低 Yb 喜马拉雅型花岗岩体。

胶北隆起区三佛山岩体 Eu/Eu^* 平均为 0.79, 郭家岭岩体 Eu/Eu^* 平均为 0.905, 均具有微弱的 Eu 负异常^[20]。高 Sr 含量和明显亏损 Y 和 Yb 等重稀土元素, 具有明显的埃达克岩特征。试验岩石学表明, 埃达克型花岗岩的形成压力通常在 10~12.5 kbar, 深度在 30~40 km^[21]。胶北隆起早白垩世花岗岩数据与玄武岩熔融试验数据及胶南岩体数据相比具有较高的含镁指数(图 13(a)), 华北板块与胶北隆起岩体同时侵位的基性岩也具有高镁指数、高钾含量的地化特征^[11], 即低的 Y 和 Yb 等重稀土元素, 富集轻稀土和大离子亲石元素。而纯的地壳熔体通常具有高钾和低 $Mg^\#$ 的特征, 因此基性和酸性岩浆的混合及分异可以解释胶北隆起早白垩世花岗岩的成因。因此, 胶北隆起带这些高 Sr 含量、高 La/Yb、Sr/Y 比值以及明显亏损 Y 和 Yb 的花岗岩可能是俯冲加厚大陆地壳环境下, 下地壳基性物质部分熔融的结果(图 15)。

胶南隆起区早白垩世岩体的 $Mg^\#$ 为 11.7~41.9, 平均 31.2, 呈现出相对胶北隆起花岗岩更低的 $Mg^\#$ 特征, 加之明显低于 400×10^{-6} 的 Sr 含量、中等的负 U 异常和贫 Yb 等特征, 表明残留相有较多斜长石和石榴石, 因此花岗岩的源岩可能来自含有石榴石和斜长石的高压麻粒岩相的大陆地壳(图 15)。

综上所述, 早白垩世胶东半岛早白垩世花岗岩的形成环境为俯冲加厚熔融的大陆地壳, 区别在于胶南、胶北两区早白垩世花岗岩岩体的形成深度不同。胶北隆起区的高 Mg 高 Sr 低 Yb 特征的埃达克型花岗岩形成深度相对较深(30~40 km), 可能由镁铁质下地壳熔融分异形成; 胶南隆起区表现出低 Mg 低 Sr 低 Yb 特征的喜马拉雅型花岗岩形成环境较浅(>30 km), 源岩可能来自高压麻粒岩相的大陆地壳(图 15)。



I—高 Sr 低 Yb 型; II—低 Sr 低 Yb 型; III—高 Sr 高 Yb 型;
IV—低 Sr 高 Yb 型; V—非常低 Sr 高 Yb 型

图 14 胶东半岛早白垩世花岗岩 Sr-Yb 分类图

Fig. 14 Granite classification on the basis of Yb and Sr contents

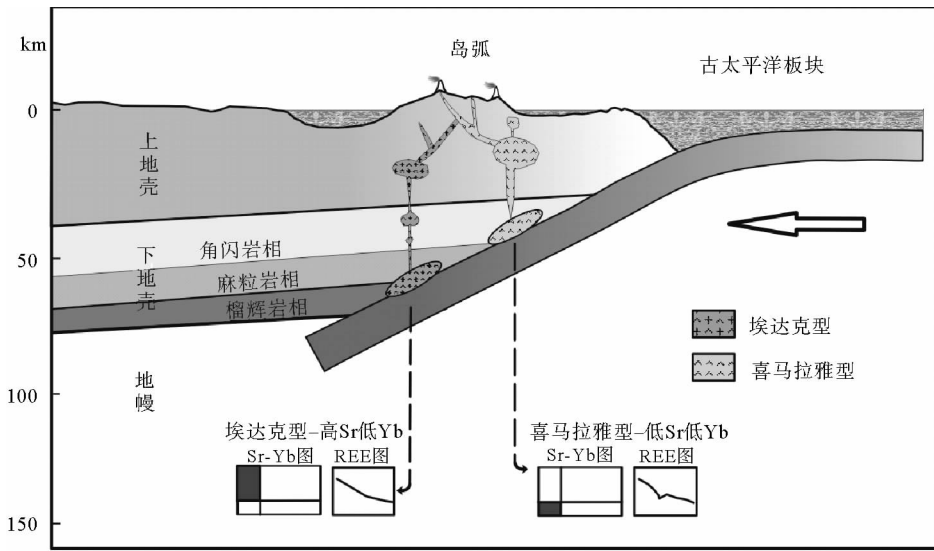


图 15 胶东半岛早白垩世花岗岩形成模式图

Fig. 15 Formation depth diagram of Early Cretaceous granite from the Jiaodong Peninsula

7 结论

1) 小珠山花岗岩 SiO₂ 含量平均 70.21%，A/CNK 平均为 1.13，为强过铝质酸性岩体，具有高钾特征，显示中等程度的 LREE 富集、明显的负 Eu 异常，Yb 含量平均为 1.23 × 10⁻⁶ μg/g，Y 含量平均为 0.18 × 10⁻⁶ μg/g，Sr 含量平均为 21.93 × 10⁻⁶ μg/g，低的 Sr 与 Yb 含量表明小珠山花岗岩形成于中等深度压力的成岩环境，小珠山花岗岩为可指示存在加厚地壳的喜马拉雅型花岗岩。

2) 单颗粒锆石 LA-ICP-MS 定年结果表明，小珠山黑云母二长花岗岩两个样品加权平均年龄分别为 123 Ma 和 122 Ma，属早白垩世晚期岩浆侵入的产物。

3) 综合前人研究成果表明，胶东半岛中生代花岗岩形成于 3 个时期不同机制：晚三叠世(225~205 Ma)幔源型花岗岩，是扬子板块向华北板块碰撞俯冲形成苏鲁超高压变质带，地幔岩浆物质沿裂隙上涌，富集地幔在不同时期产生轻度熔融的结果；晚侏罗世—早白垩世(160~135 Ma)地壳重熔型花岗岩，其源岩为形成于 700~800 Ma 的扬子陆块，岩浆源岩由经历了三叠世超高压变质作用的扬子陆壳新元古代物质熔融形成。早白垩世(130~105 Ma)花岗岩形成于俯冲加厚深度不同的大陆地壳。胶北隆起区的高 Mg 高 Sr 低 Yb 的埃达克型花岗岩形成深度较深(30~40 km)，可能由镁铁质下地壳的熔融分异形成；胶南隆起区的低 Mg 低 Sr 低 Yb 的喜马拉雅型花岗岩形成环境相对较浅(<30 km)，岩浆源岩可能来自含有石榴石和斜长石的高压麻粒岩相的大陆地壳。

参考文献：

[1] 丁汝鑫, 周祖翼. 大别-苏鲁造山带、华南晚中生代花岗岩时空分布及应力场对比[J]. 地学前缘, 2011, 18(1): 9-14.
DING Ruxin, ZHOU Zuyi. A comparison between the Late Mesozoic Dabie-Sulu orogenic belt and South China in terms of their granite spatial-temporal distributions and stress fields[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(1): 9-14.

[2] 郭敬辉, 陈福坤, 张小曼, 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.
GUO Jinghui, CHEN Fukun, ZHANG Xiaoman, et al. Evolution of syn-to post-collisional magmatism from north Sulu UHP belt, eastern China: Zircon U-Pb geochronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(4): 1281-1301.

[3] 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.
ZHOU Jianbo, ZHENG Yongfei, ZHAO Zifu. Zircon U-Pb dating on Mesozoic granitoids at Wulian, Shandong province[J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(2): 185-194.

- [4] YUAN H, GAO S, LIU X, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Geostandards & Geoanalytical Research*, 2010, 28(3): 353-370.
- [5] BOYNTON W V. *Geochemistry of the rare earth element: Meteorite studies*[M]. New York: Elsevier Science Publishers, 1984: 63-114.
- [6] MCDONOUGH W F, SUN S, RINGWIND A F, et al. Potassium, rubidium, and cesium in the earth and moon and the evolution of the mantle of the earth[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 56(3): 1001-1012.
- [7] WEABER B L. The origin of ocean island basalt endmember compositions: Trace element and isotopic constraints[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104(2): 381-397.
- [8] 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 花岗岩与地壳厚度关系探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 2011, 35(2): 259-269
ZHANG Qi, JIN Weijun, LI Chengdong, et al. Granitic rock and their formation depth in the crust[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2011, 35(2): 259-269.
- [9] 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*, 2008, 37(1): 35-46.
- [10] YANG J H, CHUNG S L, WILDE S A, et al. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochemical and Nd-Sr isotopic evidence[J]. *Chemical Geology*, 2005, 214: 99-215.
- [11] 张娟. 苏鲁造山带中生代岩浆岩地球化学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
- [12] 张田, 张岳桥. 胶东半岛中生代侵入岩活动序列及其构造制约[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(2): 323-336.
ZHANG Tian, ZHANG Yueqiao. Geochronological sequence of Mesozoic intrusive magmatism in Jiaodong peninsula and its tectonic constraints [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(2): 323-336.
- [13] 张华锋, 翟明国, 何中甫, 等. 胶东昆嵛山杂岩中高锶花岗岩地球化学成因及其意义[J]. *岩石学报*, 2004, 20(3): 369-380.
ZHANG Huafeng, ZHAI Mengguo, HE Zhongfu, et al. Petrogenesis and implications of the sodium-rich granites from the Kunyushan complex, Eastern Shandong province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 369-380.
- [14] 杨海斌, 田小波, 白志明, 等. 浅谈中国大陆东缘中生代地质演化与泛太平洋板块活动的关系[J]. *吉林大学学报*, 2016, 46(3): 781-797.
YANG Haibin, TIAN Xiaobo, BAI Zhiming, et al. Discussion on the relationship between Pan Pacific Plate movement and Mesozoic geological evolution of Eastern Chinese continent[J]. *Journal of Jilin University*, 2016, 46(3): 781-797.
- [15] GAO J D, FENG Q, ZHANG X L, et al. Zircon U-Pb geochronology of crystal tuff on Lingshan island and its geological implications for magmatism, stratigraphic age and geological events[J]. *Nature*, 2018, 8: 1-9.
- [16] RAPP R P, WASTON E B. Dehydration melting of meta basalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust mantle recycling[J]. *Petrol*, 1995, 36: 891-931.
- [17] PAUL A M. Slab melting as an explanation of Quaternary volcanism and a seismicity in southwest Japan [J]. *Geology*, 1995, 23(5): 395-398.
- [18] 陈斌, 田伟, 翟明国, 等. 太行山和华北其它地区中生代岩浆作用的锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其岩浆成因和地球动力学意义[J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 13-24.
CHEN Bing, TIAN Wei, ZHAI Mengguo, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mesozoic magmatism in the Taihang Mountains and other places of the North China craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(1): 13-24.
- [19] 刘红涛, 孙世华, 刘建明, 等. 华北克拉通北缘中生代高锶花岗岩类: 地球化学与源区性质[J]. *岩石学报*, 2002, 18(3): 257-274.
LIU Hongtao, SUN Shihua, LIU Jianming, et al. The Mesozoic high-Sr granitoids in the northern marginal region of North China Craton: Geochemistry and source region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(3): 257-274.
- [20] 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.
LUO Xiandong, YANG Xiaoyong, DUAN Liuan, et al. Geochemical and geochronological study of the cold-related Guojianling pluton and Shangzhuang pluton in Jiaodong block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(10): 1874-1888.
- [21] QIAN Q, HERMANN J. Partial melting of lower crust at 10-15 kbar: Constraints on Adakite and TTG formation [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2013, 165: 1195-1224.