

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.376>



# 胶东范家庄地区晚侏罗世低镁埃达克质花岗岩成因及构造背景

刘晓阳<sup>1</sup>, 谭俊<sup>1\*</sup>, 王怀洪<sup>2,3</sup>, 王勇军<sup>2,3,4</sup>, 甘颢荣<sup>1</sup>, 王治华<sup>1</sup>, 张铭<sup>1</sup>

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
2. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东济南 250100
3. 中国地球物理学会煤田地球物理重点实验室, 山东济南 250100
4. 山东省煤田地质局第一勘探队, 山东枣庄 277000

**摘要:** 胶东地区广泛发育一系列晚侏罗世岩浆作用产生的埃达克质岩, 其成因机制及构造背景研究为揭示胶东地区中生代构造演化提供了重要证据. 选取出露于胶东苏鲁地区的范家庄花岗岩进行锆石 U-Pb 年龄、全岩主微量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素组成分析, 探讨了岩石成因及成岩构造背景. 锆石 U-Pb 年龄结果表明范家庄花岗岩侵位于晚侏罗世 ( $161 \pm 2$  Ma). 岩石主微量数据具有富硅 ( $\text{SiO}_2 = 68.94\% \sim 71.00\%$ )、高铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15.17\%$ )、低镁 ( $\text{MgO} = 0.32\% \sim 0.41\%$ ); 高 Sr、低 Y、Yb 含量以及高  $(\text{La}/\text{Yb})_N (> 38.59)$  比值的特点, 同位素测试结果显示相对高的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  比值 ( $0.70928 \sim 0.71141$ )、相对较低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 ( $-20.5 \sim -14.1$ ) 和高放射性 Pb 同位素组成 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 16.853 \sim 17.207$ , ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.436 \sim 15.495$ , ( $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 37.340 \sim 37.629$ . 综合分析认为, 范家庄岩体属于低镁埃达克质岩, 产于增厚下地壳部分熔融, 源区以扬子板块下地壳组分为主, 混合有华北板块下地壳成分. 晚侏罗世伊泽奈奇板块俯冲形成的弧后拉张环境诱发重力不稳定或者岩石圈伸展造成加厚的造山带垮塌, 软流圈上涌的导致加厚地壳部分熔融可能是形成胶东范家庄低镁埃达克质岩的地球动力学背景.

**关键词:** 地球化学; Sr-Nd-Pb 同位素; 低镁埃达克质岩; 晚侏罗世; 范家庄; 胶东.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2020)02-451-16

收稿日期: 2018-12-03

## Petrogenesis and Tectonic Setting of the Late Jurassic Low-Mg Adakitic Granites in the Fanjiazhuang Area, Jiaodong Peninsula

Liu Xiaoyang<sup>1</sup>, Tan Jun<sup>1\*</sup>, Wang Huaihong<sup>2,3</sup>, Wang Yongjun<sup>2,3,4</sup>, Gan Jinrong<sup>1</sup>, Wang Zhihua<sup>1</sup>, Zhang Ming<sup>1</sup>

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Shandong Provincial Research Institute of Coal Geology Planning and Exploration, Jinan 250100, China
3. Key Laboratory of Coalfield Geophysics, Geophysical Society of China, Jinan 250100, China
4. The First Prospecting Team of Shandong Coal Geology Bureau, Zaozhuang 277000, China

**Abstract:** A series of late Jurassic adakitic rocks are widely developed in the Jiaodong Peninsula, eastern China, and their petrogenesis and tectonic setting provide important evidence for Mesozoic tectonic evolution in Jiaodong area. In this study, we investigate the bulk-rock major element, trace element and Sr-Nd-Pb isotopes of the granitoid exposed in the Fanjiazhuang area. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results yield a weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age of  $161 \pm 2$  Ma for the Fanjiazhuang granitoid. Geochemical data indicate that the intrusion is characterized by high  $\text{SiO}_2$  ( $68.94\% \sim 71.00\%$ ),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $> 15.17\%$ ), Sr but low MgO

**基金项目:** 山东省煤田地质局 2017 年度科研专项基金项目 (No. 鲁煤地科字 (2017) 2 号).

**作者简介:** 刘晓阳 (1993-), 男, 博士研究生, 主要从事矿床及矿产勘查研究工作. ORCID: 0000-0001-6915-9042. E-mail: xihai-firework@foxmail.com

\* **通讯作者:** 谭俊, E-mail: tanjunallan@163.com

**引用格式:** 刘晓阳, 谭俊, 王怀洪, 等, 2020. 胶东范家庄地区晚侏罗世低镁埃达克质花岗岩成因及构造背景. 地球科学, 45(2): 451-466.

(0.32%-0.41%), Y and Yb contents, and high Sr/Y and La/Yb ratios. The rocks exhibit high initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios (0.709 28 to 0.711 41), low  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  (-20.5 to -14.1) and they are characterized by high radiogenic Pb isotopic compositions with  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=16.853-17.207$ ,  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=15.436-15.495$ ,  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=37.340-37.629$ . The elemental and isotopic data suggest that the late Jurassic low-Mg adakitic granites in Fanjiazhuang area were derived from the partial melting of the thickened lower crust. The results show that the magma sources were dominated by lower crust of the Yangtze Block and with subordinate lower crust of the North China Block. The Izanagi plate subduction was the most likely geodynamic force for formation of the Jurassic Fanjiazhuang low-Mg adakitic granite in the Jiaodong Peninsula.

**Key words:** geochemistry; Sr-Nd-Pb isotopes; low-Mg adakitic; Late Jurassic; Fanjiazhuang; Jiaodong Peninsula.

## 0 引言

胶东地区是我国最大的金矿集中区,区内广泛分布各类中生代花岗岩类,其中晚侏罗世岩浆岩出露面积最为广泛,以胶北地体中玲珑花岗岩(150~160 Ma)(张娟, 2011; Jiang *et al.*, 2012; 黄涛等, 2014; 许继峰等, 2014)和苏鲁地体中昆崙山花岗岩(144~160 Ma)(徐洪林等, 1997; 张娟, 2011)为典型代表.许多学者针对玲珑花岗岩和昆崙山花岗岩岩石成因及其对胶东地区构造演化意义方面开展了大量地质-地球化学研究工作,从S或I型花岗岩(Ma *et al.*, 2013; 王中亮等, 2014; 赛盛勋等, 2016),埃达克质岩(Zhang *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2012a; Yang *et al.*, 2012b)两种不同成因划分出发,认为其产生于增厚下地壳的部分熔融作用,没有幔源物质的参与(Hou *et al.*, 2007; 张娟, 2011; Yang *et al.*, 2012b; 林博磊等, 2013; 黄涛等, 2014),但对岩浆源区物质来源及成岩地质背景的认识尚存在分歧. Hou *et al.* (2007)认为岩体产生于华北板块新太古代增厚下地壳的部分熔融; Zhang *et al.* (2010)认为其产生于三叠纪华北板块和华南板块陆陆碰撞的后碰撞背景下,由俯冲的华南板块部分熔融产生; Ma *et al.* (2013)则认为来源于华北板块和扬子板块碰撞增厚产生的混合源区,受伊泽奈奇板片回撤影响增厚下地壳塌陷诱发软流圈上涌发生部分熔融.黄涛等(2014)认为源区存在前寒武纪岩石被卷入陆陆碰撞事件,再循环到地壳深部发生重熔.针对源区物质属性的争议制约了对该期岩浆作用机制的理解以及对胶东地区地壳演化的认识.

本文选择出露于胶东苏鲁地区的范家庄花岗岩为研究对象,在详细野外地质调查基础上,进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析,并开展系统的主微量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学研究工作,探讨岩石成因及构造背景,为研究胶东晚侏罗世地

壳演化过程提供科学依据.

## 1 地质背景及岩石学特征

胶东地区位于华北克拉通东南缘,南邻扬子克拉通北部、东近太平洋板块西部,处于三者的交汇部位.以烟台-五莲断裂为界,由北部的胶北地体和南部的苏鲁超高压变质带组成.新太古代胶东群变质岩地层在胶东地区大面积展布,古元古代荆山群、粉子山群及新元古代蓬莱群在区内均有分布.区内断裂带多呈北东-北北东向,多被认为是其西部郯庐断裂的次级断裂,如招掖-平度断裂、烟台-五莲断裂、牟平-即墨断裂等(Qiu *et al.*, 2002; 周新华等, 2002; 陈爽等, 2018).太古代-新生代岩浆活动均有分布,以中生代岩浆活动最为强烈(图 1a).中生代侵入岩年龄主要在集中在晚三叠世、晚侏罗世及早白垩世早中期.晚三叠世侵入岩主要分布在苏鲁超高压变质东部地区,岩性以正长岩为主;晚侏罗世侵入岩在胶东地区以不规则状、椭圆状岩基形式大面积出露,岩性主要为黑云母花岗岩、黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩等,是区内金矿的主要赋矿围岩之一;早白垩世侵入岩以胶北地块中的郭家岭花岗岩及苏鲁超高压变质带中的三佛山碱性花岗岩等为代表;其次早白垩世中基性脉岩广泛发育在岩体及地层中.

研究区位于胶东地区东部,苏鲁超高压变质带的西北缘的牟乳成矿带内.区内主要呈透镜状出露古元古代荆山群变粒岩、麻粒岩、大理岩等及太古代胶东群高级变质岩.构造以北东-北北东向烟台-五莲断裂和青岛-海阳断裂的次级断裂为主.侵入岩十分发育.本文研究的花岗岩体位于烟台市牟平区南约 10 km 范家庄一带,岩体大面积出露于地表,平面形态不规则,出露岩性为黑云母二长花岗岩,以弱片麻理发育为特征,被后期石英脉及镁铁质脉岩穿插的现象较普遍(图 2a),与新太古代胶

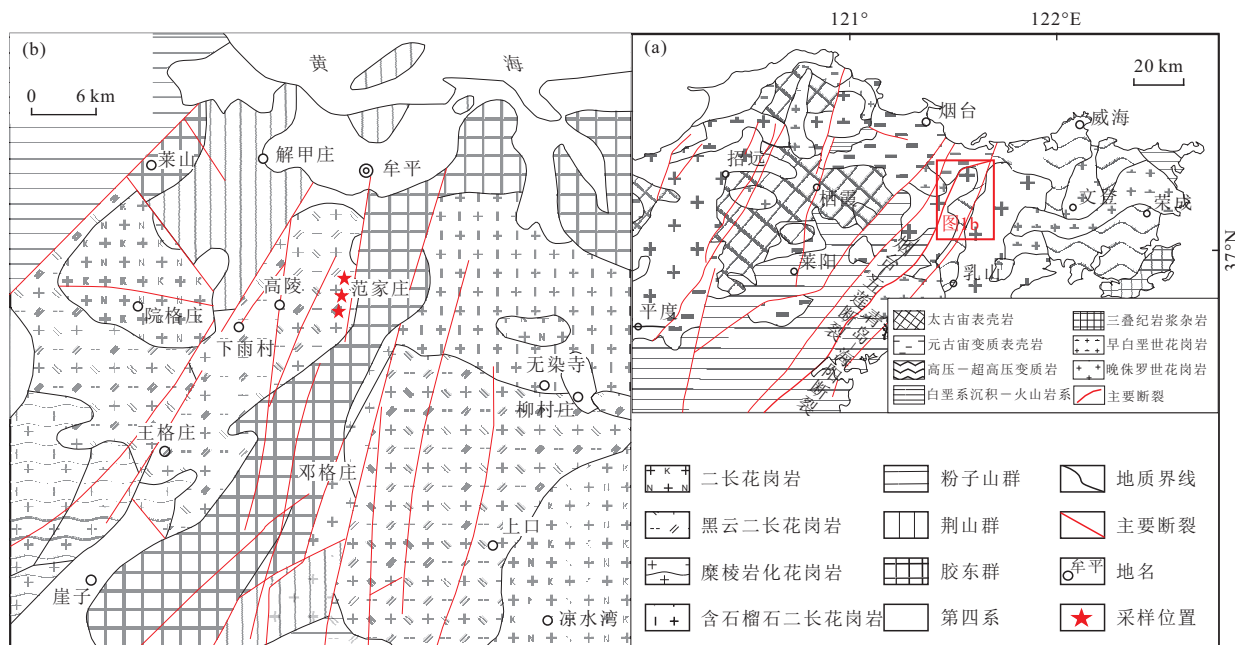


图1 胶东地区区域地质简图(a), 范家庄地区地质简图(b)

Fig.1 Geological map of the Jiaodong area (a) and geological map of the Fanjiashuang area (b)

据高太忠等(1999); 陈海燕(2010)修改

东群(图1b)及古元古代荆山群变质岩呈侵入接触关系,局部被第四系河流沉积物覆盖,岩体近地表受风化严重.

岩石手标本下呈灰白色,轻微发生蚀变(图2b).镜下呈花岗结构(图2c),局部见蠕虫结构,块状构造.主要由石英(35%)、斜长石(20%)、碱性长石(15%)、黑云母(15%)组成,副矿物可见白云母(5%)、榍石(5%)、不透明矿物(5%)等.石英以它形粒状为主,粒径约0.05~2.00 mm,均匀分布;斜长石聚片双晶发育,呈板状分布,部分发生绢云母化,可见石英呈蠕虫状生长于其中;碱性长石表面呈土褐色,形状较不规则;黑云母深褐色-浅绿色片状分布,多色性明显.

## 2 分析方法

本次研究选取1件花岗岩样品(FJZ10-6)中的锆石用于LA-ICP-MS U-Pb年代学分析,选取8件花岗岩样品用于全岩主微量元素,6件样品用于Sr-Nd-Pb同位素的测试分析.测试样品均来源于不同钻孔中,样品新鲜未发生后期蚀变,采样位置中心点坐标E121°32'15", N37°15'00".

锆石挑样委托河北省廊坊区域地质调查研究所实验室进行处理.锆石阴极发光(CL)照相及U-Pb同位素定年在武汉上谱分析科技有限责任公司

利用激光剥蚀等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)分析完成.激光剥蚀系统为GeoLas-HD, ICP-MS型号为Agilent 7900.激光束斑直径32 μm,脉冲8 Hz,剥蚀过程中采用氦气作载气,以锆石91500作外标进行同位素分馏校正,每分析5个样品内插分析2次91500.具体仪器操作条件及测试方法见(Liu *et al.*, 2008, 2010).通过分析软件ICPMS DataCal计算获得同位素比值、年龄和误差,分析结果通过ISOPLOT 4.15软件完成加权平均年龄计算和U-Pb谐和图的绘制,年龄数据采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表示.

全岩主量元素测试分析委托广州澳实分析检测有限公司完成,分析方法为X射线荧光光谱熔融法(ME-XRF26d),检出限为0.01%.微量元素(含稀土元素)测试分析委托中国科学院矿床地球化学国家重点实验室(贵阳)测定完成,测试仪器为美国PerkinElmer公司ELAN DRC-e型等离子体质谱仪,分析误差小于5%,具体测试方法及流程见(Liang *et al.*, 2000).

全岩Sr-Nd-Pb同位素化学前处理与质谱测定在南京聚谱检测科技有限公司完成,在Agilent7700x四极杆型ICP-MS上完成Sr-Nd-Pb含量测定,在Nu Plasma II MC-ICP-MS完成同位素比值测试.Sr-Nd-Pb同位素比值测定使用国际标准物质NIST SRM 987、JNdi-1、NIST SRM 981作为外



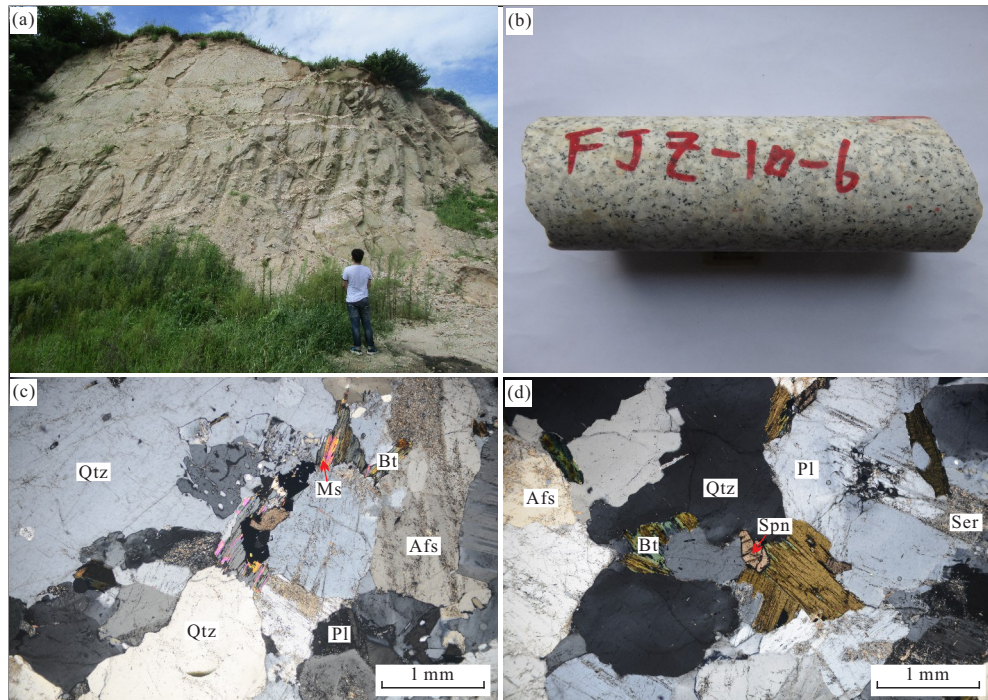


图2 范家庄花岗岩宏观及镜下照片

Fig. 2 The wild and the microscopic photos of the Fanjiazhuang granite

Qtz. 石英; Pl. 斜长石; Afs. 碱性长石; Bt. 黑云母; Ms. 白云母; Spn. 榍石; Ser. 绢云母

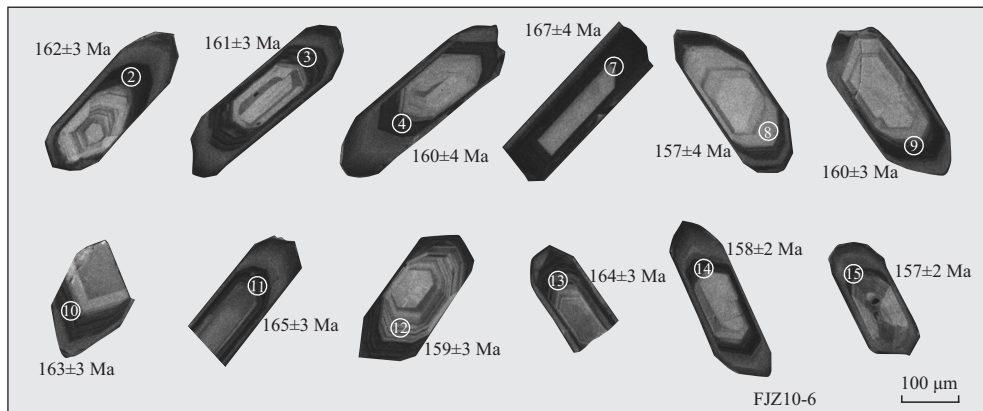


图3 范家庄花岗岩样品(FJZ10-6)锆石 CL 图

Fig. 3 Cathodoluminescence images for zircons of sample FJZ10-6

实线圈代表 U-Pb 同位素分析测试点

标, 校正仪器漂移. 详细测试方法及流程见(梁细荣等, 2003).

### 3 分析结果

#### 3.1 锆石 U-Pb 年代学

挑选范家庄花岗岩样品(FJZ10-6)中锆石共进行 15 个点的激光剥蚀 U-Pb 同位素定年分析, 获得有效点数据 12 个. 锆石阴极发光图像及 U-Pb 同位素分析结果见图 3、表 1.

范家庄花岗岩样品(FJZ10-6)样品中锆石为无色透明—淡黄色, 呈自形—半自形长柱状, 长度普遍大于  $100\ \mu\text{m}$ , 长宽比多介于 2:1~3:1 之间, CL 图像显示锆石发育明显的振荡环带(图 3). 其 U 和 Th 含量分别为  $186\times 10^{-6}\sim 4\ 718\times 10^{-6}$  和  $121\times 10^{-6}\sim 2\ 364\times 10^{-6}$ , Th/U 比值为 0.17~0.88, Th/U 比值均大于 0.1, 显示岩浆结晶锆石特点(Griffin *et al.*, 2004). 所有数据点都位于谐和线上或附近(图 4a), 12 个点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄变化于  $167\pm 4\sim$

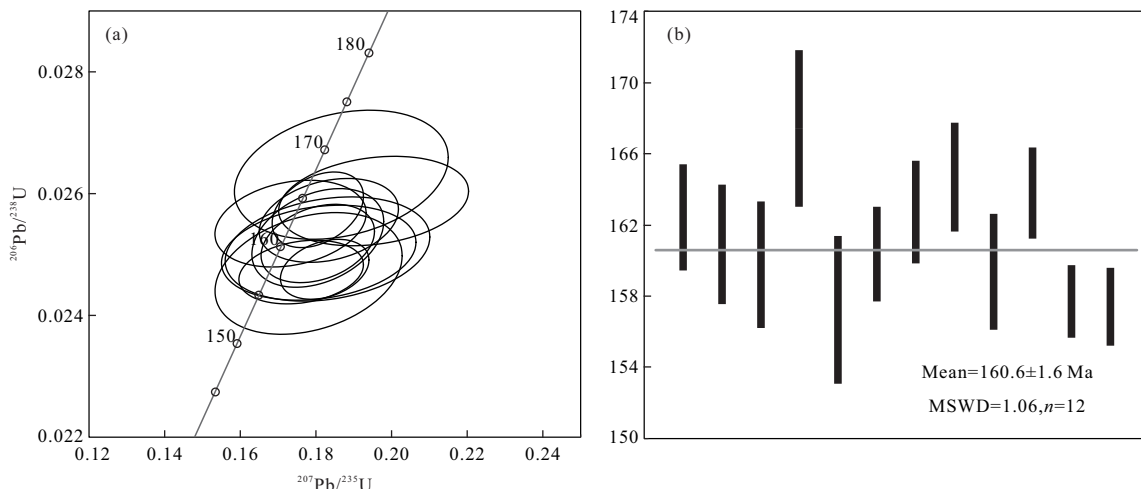


图 4 范家庄花岗岩样品(FJZ10-6)U-Pb 年龄协和图(a)和加权平均年龄图(b)

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and histogram of weighted average age (b)

表 1 胶东范家庄地区花岗岩(FJZ10-6)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of The Fanjiazhuang granite sample(FJZ10-6) from Shandong Peninsula

分析点号	Th 10 <sup>-6</sup>	U 10 <sup>-6</sup>	Th/U	U-Th-Pb 同位素比值				同位素年龄(Ma)			
				<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ
FJZ10-6-02	534	844	0.63	0.173 2	0.013 2	0.025 5	0.000 5	162	11	162	3
FJZ10-6-03	371	892	0.42	0.180 4	0.011 5	0.025 3	0.000 5	168	10	161	3
FJZ10-6-04	273	461	0.59	0.183 1	0.017 9	0.025 1	0.000 6	171	15	160	4
FJZ10-6-07	161	272	0.59	0.186 7	0.018 6	0.026 3	0.000 7	174	16	167	4
FJZ10-6-08	141	186	0.76	0.178 1	0.016 4	0.024 7	0.000 7	166	14	157	4
FJZ10-6-09	594	1 859	0.32	0.180 5	0.009 8	0.025 2	0.000 4	168	8	160	3
FJZ10-6-10	296	1 228	0.24	0.183 4	0.012 1	0.025 6	0.000 5	171	10	163	3
FJZ10-6-11	121	704	0.17	0.195 3	0.016 6	0.025 9	0.000 5	181	14	165	3
FJZ10-6-12	176	413	0.43	0.180 8	0.017 0	0.025 0	0.000 5	169	15	159	3
FJZ10-6-13	649	1 931	0.34	0.180 5	0.007 9	0.025 7	0.000 4	168	7	164	3
FJZ10-6-14	2 364	4 718	0.50	0.182 2	0.007 7	0.024 8	0.000 3	170	7	158	2
FJZ10-6-15	734	2 336	0.31	0.176 1	0.010 9	0.024 7	0.000 3	165	9	157	2

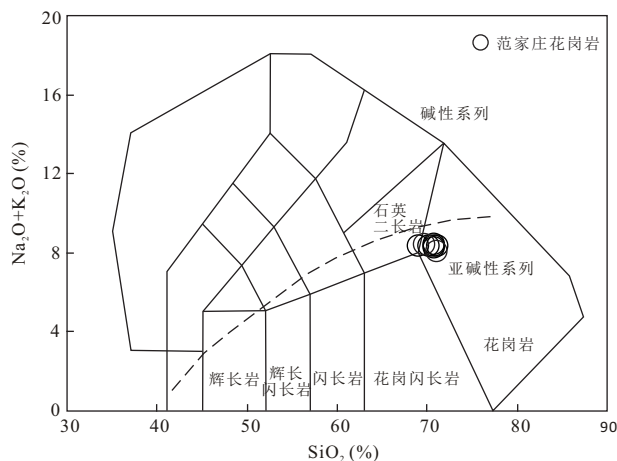


图 5 范家庄花岗岩 TAS 图解

Fig.5 Total alkalis vs. silica(TAS) diagram

157 ± 2 Ma 之间, 加权平均年龄为 161 ± 2 Ma (MSWD = 1.1). 该年龄代表范家庄花岗岩体的侵位年龄, 为晚侏罗世.

### 3.2 地球化学特征

**3.2.1 主量元素** 范家庄花岗岩体具有较为均一的岩石化学组成,  $\text{SiO}_2$  含量介于 68.94% ~ 71.00% 之间 (表 2), 均值 70.35%.  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  为 8.13% ~ 8.48%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值介于 0.89 ~ 1.02 之间, 显示轻微低钾富钠特征, 与岩石含碱性长石少于斜长石的特征一致, 在 TAS 分类图解中 (图 5), 样品点主要落在花岗岩范围内, 在  $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  图解上 (图 6a), 样品均落入高钾钙碱性系列. 岩石样品 MgO 含量为 0.32% ~ 0.41%,  $\text{Mg}^\#$  范围介于 20 ~ 29 之间, 具有低镁的特征.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 15.17% ~ 16.33%, A/

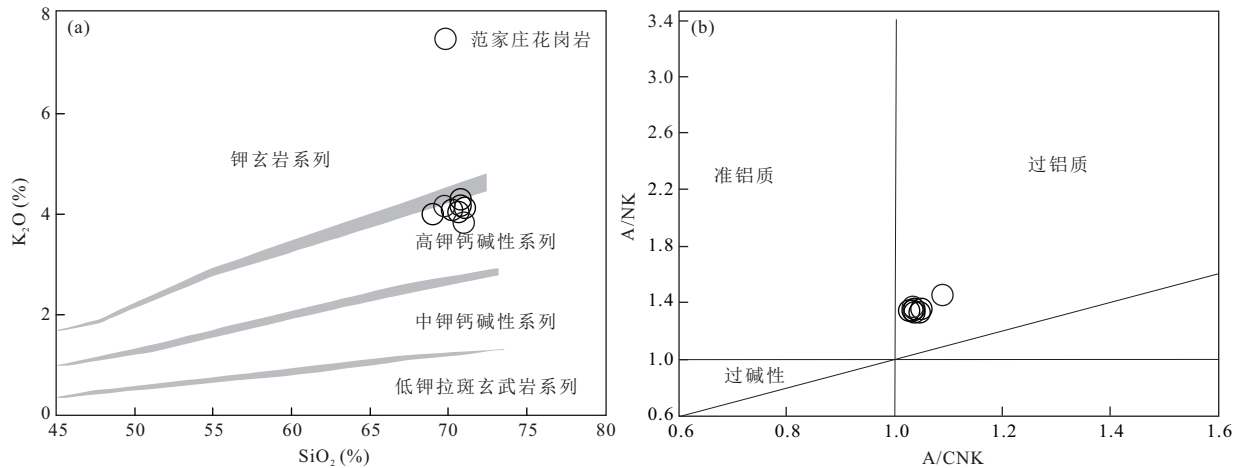
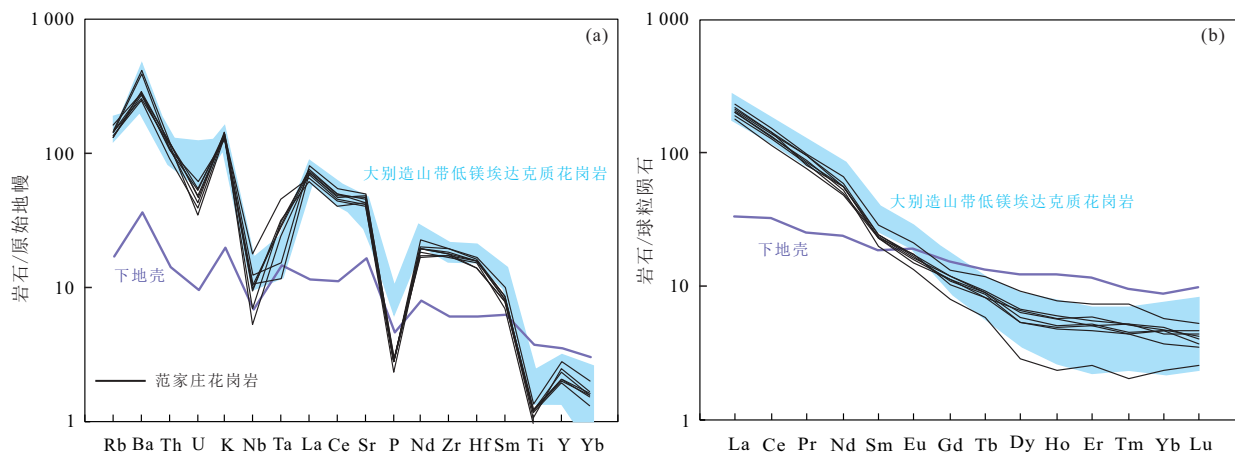
图 6 (a)K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>关系;(b)A/NK-A/CNK关系Fig.6 (a)K<sub>2</sub>O vs. SiO<sub>2</sub> diagram, (b)A/NK-A/CNK diagram

图 7 原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分图

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (b) for Fanjiazhuang granite

球粒陨石及原始地幔标准化数据据 Sun and McDonough (1989), 大陆下地壳成分引自 (Rudnick and Gao, 2003), 大别造山带低镁埃达克质岩引自 (刘质彬, 2017)

CNK 比值为 1.03~1.09, 在 A/NK-A/CNK 关系图上, 样品全部落入弱铝质区域 (图 6b), 属于弱过铝质岩石。

**3.2.2 微量元素** 范家庄花岗岩微量元素和稀土元素测试结果见表 2。可以看出, 样品具有高的 Sr ( $849 \times 10^{-6} \sim 1045 \times 10^{-6}$ ) 低 Y ( $4.24 \times 10^{-6} \sim 12.79 \times 10^{-6}$ ) 和 Yb ( $0.63 \times 10^{-6} \sim 0.99 \times 10^{-6}$ ) 的特征。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上 (图 7a), 样品显示富集 LILE (如 Rb、Ba、La、Sr、K), 亏损 HFSE (如 Nb、Ti), 但 Zr 和 Hf 亏损不明显, 相对平均大陆下地壳显示更高的 Ba、Sr、La 含量。稀土方面, 稀土总量  $\Sigma \text{REE} = 153.84 \times 10^{-6} \sim 205.74 \times 10^{-6}$ , 平均  $177.80 \times 10^{-6}$ , 稀土总量变化较小。在其

球粒陨石标准化稀土元素配分图 (图 7a) 形式呈右倾型, 显示明显的轻稀土富集 [ $(\text{La}/\text{Yb})_N = 38.6 \sim 87.6$ ], 重稀土亏损, Eu 的负异常不明显 ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.89 \sim 1.04$ ), 比平均大陆下地壳显示更高的稀土总量和更陡峭的稀土配分模式, 整体特征与大别造山带低镁埃达克质花岗岩一致 (图 7b)。

**3.2.3 全岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成** 全岩 Sr-Nd 同位素测试结果见表 3, 同位素参数计算的年龄值为本文测得锆石 U-Pb 年龄值 161 Ma。范家庄花岗岩的 Sr、Nd 同位素组成较为一致,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值 (0.709 936~0.712 082),  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值 (0.511 412~0.511 729)。具相对较高的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  比值 (0.709 28~0.711 41) 和相对较低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值

(-20.5~-14.1), 对应的两阶段 Nd 模式年龄  $T_{DM2}$  为 2.19~2.69 Ga.

后, 范家庄花岗岩  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t = 16.853 \sim 17.207$ ,  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t = 15.436 \sim 15.495$ ,  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t = 37.340 \sim 37.629$ .

全岩 Pb 同位素测试结果见表 3, 考虑到放射性成因 Pb 同位素积累, 采用成岩年龄 161 Ma 进行校正. 校正

表 2 胶东范家庄地区花岗岩主量元素(%)、微量及稀土元素( $10^{-6}$ )分析结果

Table 2 Major(%) and trace element ( $10^{-6}$ ) compositions of the Fanjiazhuang granite from Shandong Peninsula

岩性	范家庄花岗岩							
样品号	FJZ10-1	FJZ10-2	FJZ10-3	FJZ10-4	FJZ10-5	FJZ10-6	FJZ10-8	FJZ10-9
SiO <sub>2</sub>	70.6	70.72	71.00	70.19	68.94	70.74	70.91	69.70
TiO <sub>2</sub>	0.25	0.23	0.26	0.26	0.26	0.21	0.27	0.29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.52	15.17	15.56	15.60	15.74	15.46	16.33	15.82
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	2.63	2.96	2.54	2.92	2.79	2.37	1.79	1.88
MnO	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03
MgO	0.36	0.41	0.35	0.38	0.37	0.32	0.36	0.38
CaO	1.98	1.74	1.94	1.86	2.00	1.84	2.08	2.04
Na <sub>2</sub> O	4.36	4.15	4.29	4.31	4.39	4.20	4.31	4.31
K <sub>2</sub> O	4.00	4.15	4.11	4.05	3.97	4.28	3.82	4.13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06
LOI	0.22	0.41	0.33	0.48	0.31	0.27	0.30	0.24
Total	100.02	100.05	100.48	100.16	98.87	99.78	100.25	98.87
A/CNK	1.03	1.05	1.03	1.05	1.04	1.04	1.09	1.04
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	8.36	8.30	8.40	8.36	8.36	8.48	8.13	8.44
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.92	1.00	0.96	0.94	0.90	1.02	0.89	0.96
Mg#	21	22	21	20	21	21	29	28
La	50.82	44.67	42.58	51.39	49.43	48.26	48.81	56.04
Ce	87.12	79.06	70.70	88.81	84.28	80.81	83.03	95.22
Pr	7.78	7.86	7.34	9.00	9.14	8.33	8.24	9.42
Nd	26.16	23.36	22.40	27.25	26.12	24.39	26.54	30.90
Sm	3.49	3.60	3.47	3.75	3.76	3.02	3.58	4.42
Eu	0.88	0.96	0.93	0.96	1.01	0.79	1.01	1.23
Gd	2.32	2.48	2.32	2.24	2.46	1.66	2.11	2.71
Tb	0.31	0.34	0.33	0.33	0.33	0.22	0.31	0.45
Dy	1.35	1.71	1.62	1.37	1.50	0.72	1.69	2.36
Ho	0.27	0.34	0.32	0.28	0.29	0.13	0.33	0.45
Er	0.76	0.90	0.84	0.84	0.86	0.42	0.97	1.22
Tm	0.11	0.13	0.11	0.13	0.12	0.05	0.13	0.19
Yb	0.63	0.83	0.78	0.74	0.78	0.40	0.80	0.99
Lu	0.09	0.10	0.09	0.11	0.12	0.06	0.11	0.13
ΣREE	182.11	166.34	153.84	187.22	180.19	169.27	177.66	205.74
LREE/HREE	30.14	23.33	22.96	29.97	26.93	45.14	26.55	23.19
Sr/Y	102.7	76.8	85.9	101.7	108.5	206.1	106.6	81.7
(La/Yb) <sub>N</sub>	57.6	38.6	39.2	49.7	45.6	87.6	43.8	40.7
Eu/Eu*	0.89	0.93	0.94	0.94	0.95	0.97	1.04	1.01
Sc	8.67	8.29	7.98	6.96	6.70	6.40	1.95	2.11
V	4.9	8.2	6.4	8.9	7.9	7.3	6.4	6.7
Cr	31.3	27.0	11.1	18.7	18.1	16.8	0.6	1.1
Co	254.11	237.27	231.7	181.22	176.82	186.84	1.49	1.56
Ni	30.4	28.2	23.4	22.5	20.5	23.2	0.7	1.0
Rb	90	101	87	91	84	84	92	93

续表

岩性	范家庄花岗岩							
Sr	911	849	898	946	995	874	1010	1045
Y	8.87	11.05	10.45	9.30	9.17	4.24	9.47	12.80
Zr	199	195	192	214	206	186	198	215
Nb	4.88	12.70	6.68	6.89	7.23	3.78	7.50	8.84
Ba	1 767	1 978	1 714	1 963	2 002	1 869	2 730	2 877
Hf	4.23	4.78	4.24	5.00	4.87	4.75	4.84	5.14
Ta	1.26	1.86	1.28	1.17	1.13	0.99	0.48	0.62
Pb	23.4	31.0	23.0	26.7	27.0	28.3	29.5	29.6
Th	9.81	9.10	7.81	10.05	10.19	9.16	9.02	10.30
U	0.73	1.09	0.81	1.02	1.14	0.88	1.30	0.97

注: LOI. 烧失量;  $Mg^\# = 100 \times Mg^{2+} / (Mg^{2+} + 0.9 \times Fe_2O_3^T)$ ;  $A/CNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$  摩尔比

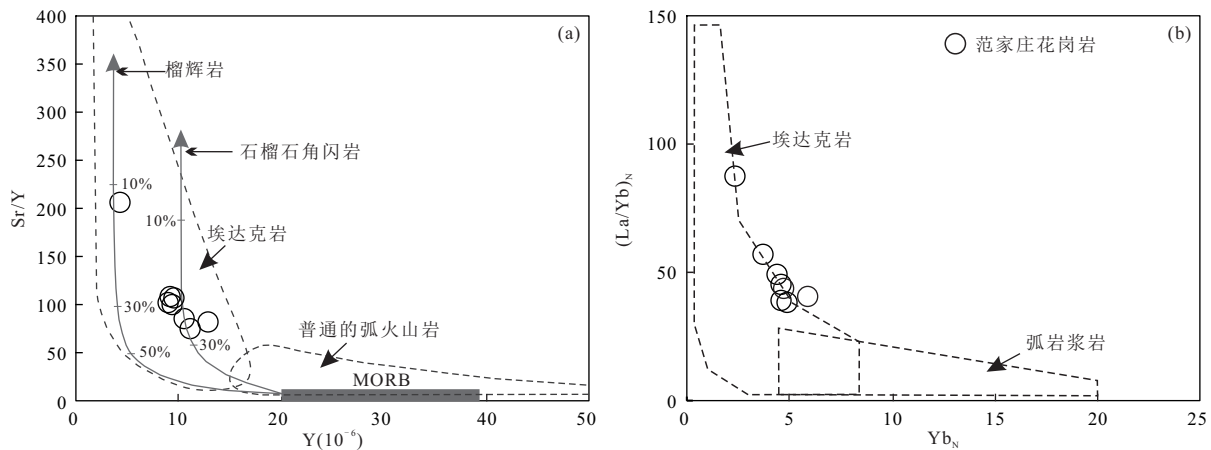


图 8 埃达克质岩 Sr/Y vs. Y 和  $(La/Yb)_N$  vs.  $Yb_N$  判别图解

Fig. 8 Adakitic trace elemental discrimination diagrams for Fanjiazhuang granite

图 a 据 Ma *et al.* (2013) 修改

## 4 讨论

### 4.1 岩石成因

范家庄晚侏罗世花岗岩具有高  $SiO_2$  ( $\geq 68.94\%$ )、高铝 ( $Al_2O_3 \geq 15.17\%$ )、低  $MgO$  ( $\leq 0.41\%$ )，富集 LILE (Rb、Ba、La、Sr、K)，亏损 HFSE (Nb、Ti)，以及高 Sr ( $\geq 849 \times 10^{-6}$ )，低 Y ( $\leq 12.79 \times 10^{-6}$ ) 和 Yb ( $\leq 0.99 \times 10^{-6}$ )，高 Sr/Y 比值 ( $\geq 77$ ) 和 La/Yb 比值 ( $\geq 54$ )，亏损 HREE，有微弱的负 Eu 异常的特征，符合典型埃达克岩或埃达克质岩的地球化学特征 (Defant and Drummond, 1990; Atherton and Petford, 1993; Kay and Kay, 1993; Kay *et al.*, 1993). 所有样品点在 Sr/Y-Y 和  $(La/Yb)_N$ - $Yb_N$  图解上 (图 8) 均落入埃达克岩范围内. 其低的  $MgO$  含量 ( $0.32\% \sim 0.41\%$ ) 及  $Mg^\#$  ( $20 \sim 29$ ) 显示出低镁埃达克岩特点. 前人研究表明，埃达克质岩主要有以下 4 种成因：(1) 俯冲玄武质洋壳

部分熔融与上覆地幔橄榄岩反应 (Defant and Drummond, 1990; Kelemen *et al.*, 1995); (2) 玄武质岩浆经历 AFC 过程演化产生 (Feeley and Hacker, 1995; Wareham *et al.*, 1997; Castillo *et al.*, 1999); (3) 拆沉下地壳部分熔融，随后与地幔橄榄岩反应形成 (Kay and Kay, 1993; Gao *et al.*, 2004); (4) 大陆俯冲或者碰撞带的增厚下地壳部分熔融 (Muir, 1995; Petford and Atherton, 1996). 不同成因的埃达克质岩在元素和同位素方面会显示不同特征.

范家庄埃达克质岩具有高的  $SiO_2$  ( $68.94\% \sim 71.00\%$ )、 $K_2O$  ( $3.82\% \sim 4.28\%$ ) 和初始  $^{87}Sr/^{86}Sr$  比值 ( $0.70928 \sim 0.71141$ )，以及低的  $Na_2O/K_2O$  比值 (约等于 1) 和负的  $\epsilon_{Nd}(t)$  ( $-14.1 \sim -20.5$ ) 值与典型俯冲洋壳部分熔融产生的埃达克岩贫 K、高  $Na_2O/K_2O$  比值 ( $> 12$ )、低 Sr 同位素初始值 [ $^{87}Sr/^{86}Sr < 0.7045$ ] 和正的 Nd 同位素比值 [ $\epsilon_{Nd}(t) > 6$ ] 的特征明显不同 (Defant and Drummond, 1990; 张旗等，



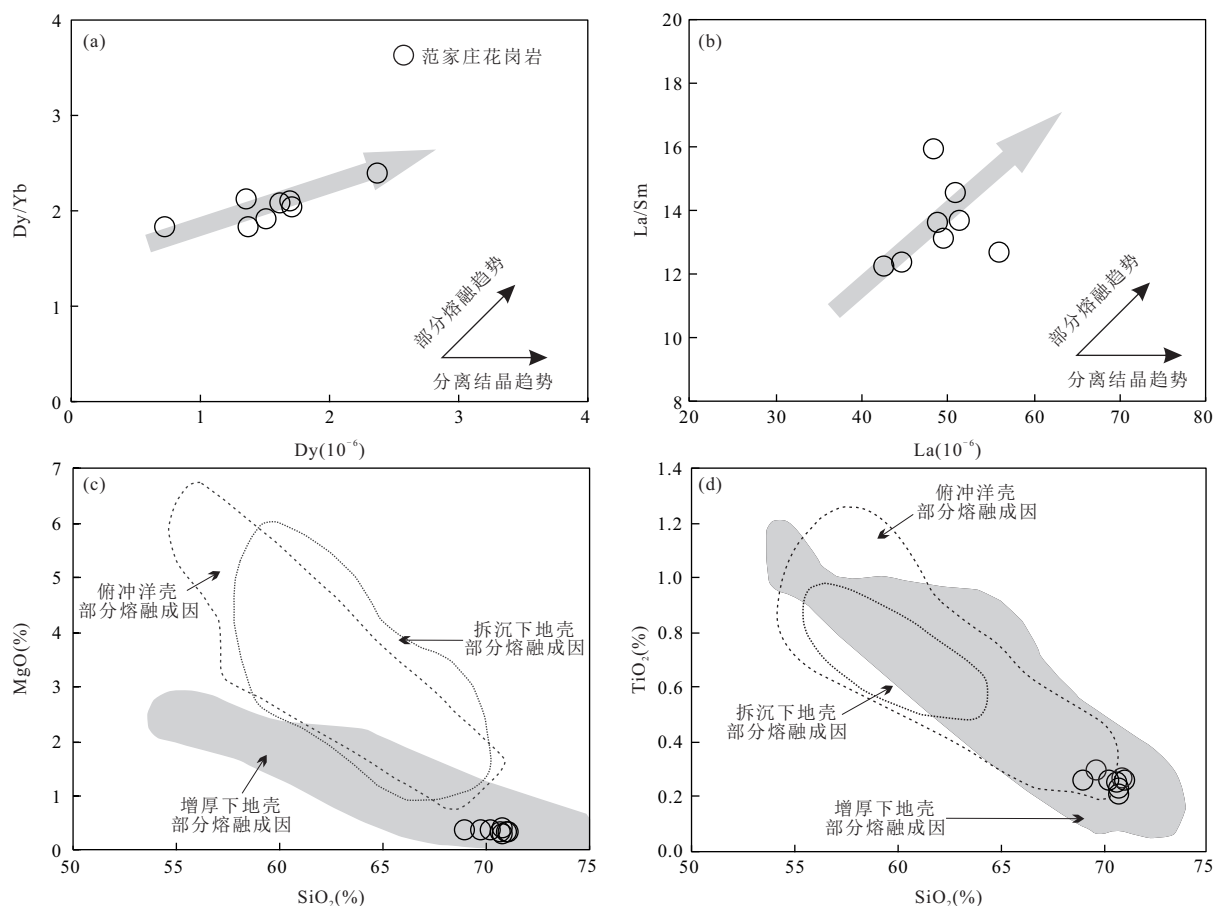


图9 范家庄花岗岩 Dy/Yb-Dy图解(a), La/Sm-La图解(b), MgO-SiO<sub>2</sub>图解(c)与 TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>图解(d)

Fig. 9 Dy/Yb vs. Dy diagram (a), La/Sm-La diagram (b), MgO vs. SiO<sub>2</sub> diagram (c) and TiO<sub>2</sub> vs. SiO<sub>2</sub> diagram for Fanjiazhuang granite

c, d. 底图据 Wang *et al.* (2007) 和 Moyan (2009) 修改

2009), 排除了俯冲洋壳部分熔融这一成因机制。

范家庄花岗岩微弱的负 Eu 异常显示岩石没有经历斜长石的分离结晶, Dy/Yb-Dy 和 La/Sm-La 地球化学图解(图 9a、b)显示岩浆成岩过程以部分熔融为主而非经历分离结晶。另外玄武质岩浆要经过 AFC 过程会产生一个由基性到酸性的岩石系列, 被认为是这一成因的埃达克质岩地区均产出基性—中性—酸性岩石系列 (Castillo *et al.*, 1999; Macpherson *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2009), 胶东半岛迄今为止未发现与范家庄花岗岩同时代的中基性侵入岩, 因此范家庄花岗岩并不是由玄武质岩浆经历 AFC 过程演化产生。拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克质岩, 上升过程中不可避免的会与地幔橄榄岩反应会产生 MgO 含量大于 3%、Mg<sup>#</sup>>50 和 Cr、Ni 含量较高的埃达克质熔体 (Xu *et al.*, 2008; Hu *et al.*, 2012; 孙立强等, 2017), 而样品具有低的 MgO、Cr、Ni 含量以及低的 Mg<sup>#</sup> 值, 表明初始岩浆

未经历与地幔橄榄岩的相互作用。在 MgO-SiO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 图解上(图 9c、d), 样品点也均未落入拆沉下地壳部分熔融成因埃达克质岩范围内。同时幔源物质的加入还会降低壳源岩浆产物中的 Sr 同位素比值提高其 Nd 同位素比值, 这与样品中 Sr-Nd 同位素特征不一致。这些元素及同位素地球化学表明, 范家庄埃达克质岩不是拆成下地壳部分熔融形成。

范家庄花岗岩最有可能的成因机制是直接由增厚下地壳部分熔融产生。样品高的初始 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值及低 εNd(*t*) 值和低的常放射性成因 Pb 同位素(表 3)组成显示古老下地壳的特征, 相对老的两阶段 Nd 模式年龄 ( $T_{DM2}=2.19\sim 2.69$  Ga), 佐证了其源区为古老的下地壳。其低的 MgO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、Cr、Ni 含量和相对高的 K<sub>2</sub>O (>3.82%) 均指示侵入体在形成上升过程中未受到地幔物质的污染 (Rapp *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2007)。在 MgO-SiO<sub>2</sub> 和

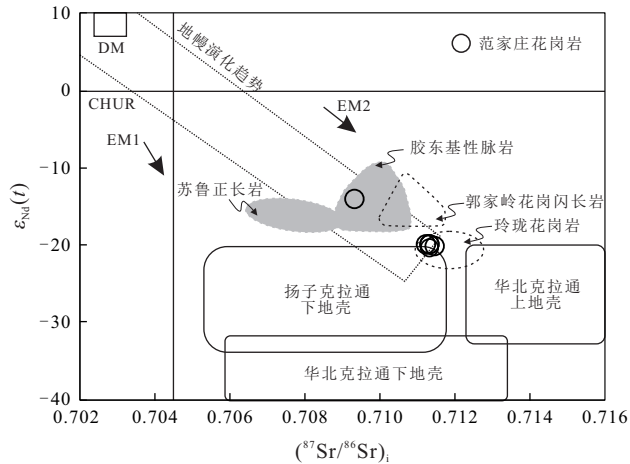


图 10 范家庄花岗岩  $\epsilon_{Nd}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解

Fig.10 Initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs.  $\epsilon_{Nd}(t)$  value for Fanjiazhuang granite.

图据 Yang *et al.* (2012b) 修改

$\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  图解上 (图 9) 均落入增厚下地壳部分熔融成因埃达克质岩范围内。

实验岩石学研究表明,玄武质岩石可以通过部分熔融产生低镁的埃达克质熔体 (Rapp *et al.*, 1999), 范家庄花岗岩具有低的  $\text{MgO}$  (0.32%~0.41%) 和低的  $\text{Mg}^\#$  (20~22) 特征。由于石榴石强烈富集重稀土, 角闪石富集中稀土, 样品强烈的 LREE 和 HREE 分馏模式 [ $(\text{La}/\text{Yb})_N = 38.6 \sim 87.6$ ] (图 7a) 以及高的 Sr/Y 比值显示源区存在石榴石和角闪石的残留, 缺少明显的负 Eu 异常显示无斜长石残留。研究发现在压力大于 1.5GPa 时, 即部分熔融深度大于 50km 时, 斜长石消失而石榴石和角闪石在残留相中占主导地位 (Sen and Dunn, 1994; Rapp and Watson, 1995; Stern and Kilian, 1996; Zhang *et al.*, 2010), 因此源区存在增厚下地壳。参考 Sr/Y 和 Y 数据的模拟计算投图 (图 8a), 可以得出范家庄花岗岩可能是由含约 20%~30% 石榴石角闪岩残留相的增厚下地壳玄武质岩浆部分熔融而成。

进一步通过 Sr-Nd-Pb 同位素区分岩浆源区中所涉及的增厚下地壳是来自华北板块还是扬子板块的贡献。范家庄低镁埃达克质岩具有高的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  比值和低的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值, 5 件样品与胶东晚侏罗世玲珑花岗岩分布范围一致 (图 10), 表明其有相似的源区, 而玲珑花岗岩被认为具有扬子板块下地壳和华北板块下地壳混合的岩浆源区 (Zhang *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2012b; Ma *et al.*, 2013), 在  $\epsilon_{Nd}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  图解中 (图 10), 样品点落入扬子

克拉通下地壳范围内, 接近华北克拉通上地壳分布范围, 指示其主要源区为扬子板块但不排除有华北板块物质加入, 一件样品 (FJZ10-1) 相比其它样品显示出更低的初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值和略高的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值, 与苏鲁正长岩及胶东基性脉岩有相似的 Sr-Nd 同位素组成 (图 10), 显示更具扬子板块下地壳属性的特点。另外在 Pb 同位素方面, 范家庄低镁埃达克质岩与苏鲁造山带南缘蚌埠地区出露的中生代荆山、西庐山岩体 Pb 同位组成较为一致 (图 11), 这一特征说明可能存在相同的岩浆源区。而荆山、西庐山岩体具有相对偏高的放射性 Pb 同位素组成被认为岩浆源区以经历超高压变质作用改造的扬子板块基底物质为主 (杨德彬, 2009), 同时样品点落入大别-苏鲁超高压变质岩和 华北板块中生代镁铁质岩范围内 (图 11), 前者大别-苏鲁超高压变质岩源区为俯冲的扬子板块北部的大陆岩石圈 (Zhao and Zheng, 2009), 这一特征可能指示范家庄低镁埃达克质岩源区中增厚下地壳深俯冲的扬子板块部分, 后者可能暗示源区混合碰撞造成的增厚的下地壳中的华北板块部分。这与 Sr-Nd 同位素显示混合源区的特征一致。前人研究发现, 胶东地区其他侏罗纪岩体中 (玲珑岩体、昆崙山岩体等) 既存在大量代表扬子陆块岩浆活动特征的新元古代继承锆石 (~780 Ma) (张娟, 2011), 也存在部分代表华北陆块岩浆活动 (~2 500 Ma) 的继承锆石 (苗来成等, 1998; Zhang *et al.*, 2010; 王世进等, 2011)。综上所述, 范家庄低镁埃达克质岩产生于以扬子板块下地壳组分为主, 同时混染华北板块下地壳成分的混合源区。

#### 4.2 构造背景

胶东地区晚侏罗世强烈的岩浆作用被认为是增厚下地壳部分熔融的产物, 一般认为造山带地壳增厚发生在陆陆深俯冲或碰撞过程中, 而增厚造山带地壳部分熔融通常由重力失衡或造山后期伸展环境导致的构造垮塌引起 (Dewey, 1988; Xie *et al.*, 2006)。研究表明, 三叠纪, 扬子板块自南东向北西深俯冲到华北板块之下 (Xu *et al.*, 2006, 2008), 随后发生陆陆碰撞形成大别-苏鲁超高压变质岩系和一系列的碰撞后碱性岩浆岩 (Zheng, 2008; Zhao and Zheng, 2009)。陈竟志和姜能 (2011) 认为胶东晚三叠世碱性杂岩体源区为扬子板块岩石圈。表明晚三叠世在胶东地区已存在扬子板块属性的增厚地壳。但是包括本文研究的范家庄

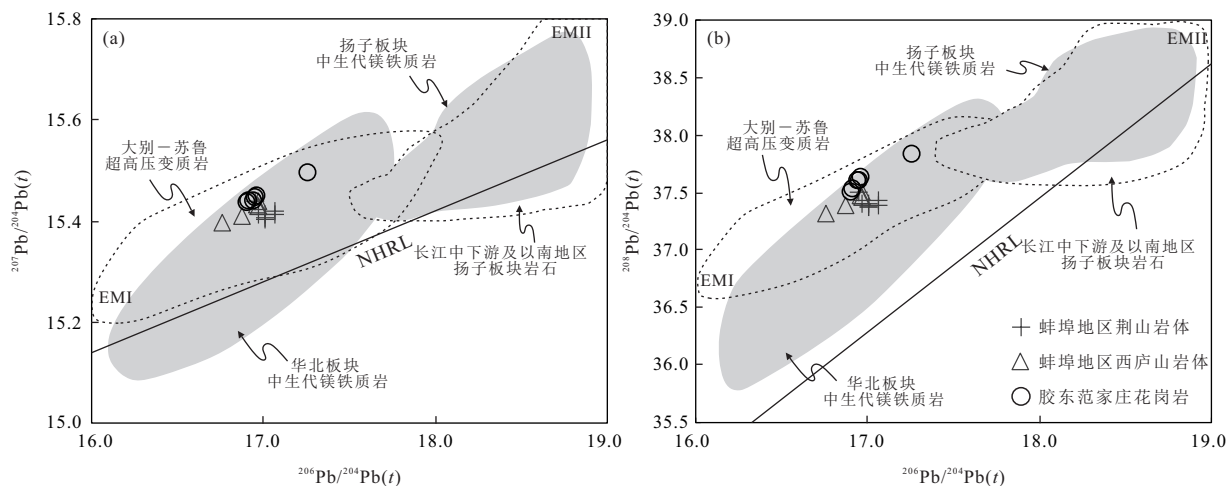


图 11 范家庄花岗岩  $^{207}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}(t)$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}(t)$ 和  $^{208}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}(t)$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}(t)$ ,

Fig. 11 Initial  $^{207}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$  vs. initial  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$  diagrams for the Fanjiazhuang granite

图据 Yang *et al.* (2012a)修改, 蚌埠地区荆山及西庐山岩体引自(杨德彬, 2009).

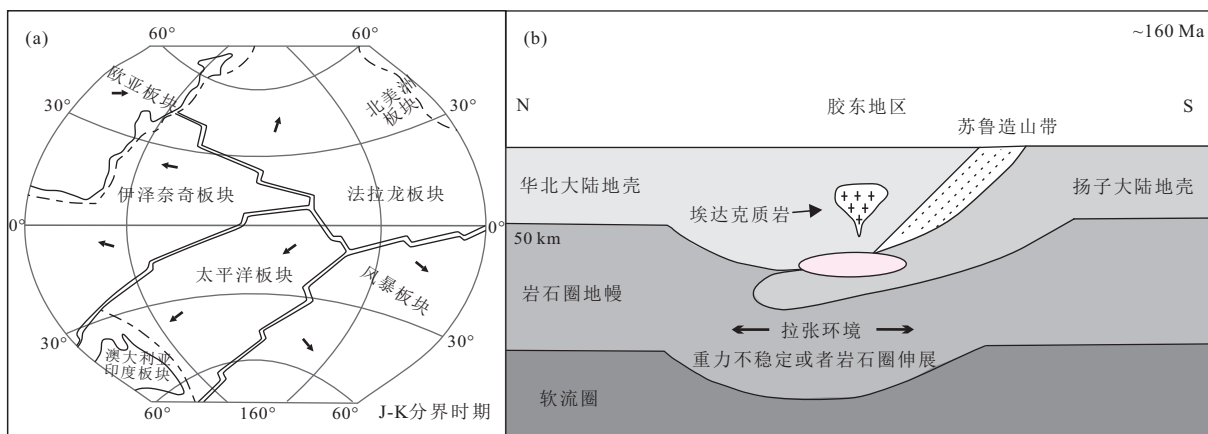


图 12 伊泽奈奇板块与太平洋板块相互关系复原图(a)及胶东范家庄埃达克质岩演化模式图(b)

Fig. 12 Restoration map of the Izanagi plate and the Pacific plate (a); Geodynamic model for the generation and emplacement of the Fanjiazhuang granite in the Shandong Peninsula(b)

图 a 据肖庆辉等(2010)修改

埃达克质岩在内的胶东一系列晚侏罗世岩浆作用距晚三叠世后碰撞过程相差 40~60 百万年, 显然后碰撞作用引起的伸展并不能持续到晚侏罗世, 其部分熔融作用应由其它地球动力学机制控制。

Moore(1989)研究表明(图 12a), 侏罗纪末期欧亚板块东部是伊泽奈奇板块而不是太平洋板块, 伊泽奈奇板块的俯冲可能在晚侏罗世中国东部地区的岩浆作用中起重要作用, Cande *et al.* (1989)通过研究洋底磁条带认为太平洋板块存在 156.6 Ma 的增生期, 受太平洋板块增生扩张产生的推力作用, 伊泽奈奇板块开始向欧亚板块俯冲(Seton and Müller, 2008; Zhang *et al.*, 2009; 丁正江等, 2015), 这一时期与胶辽、徐淮地区晚侏罗世岩浆活

动相对应. 以上地区晚侏罗世可能处于伊泽奈奇板块俯冲形成弧后大陆处于拉张环境下, 这一推测已有研究证实. 李刚(2010)通过对辽西医巫闾山地区伸展型韧性剪切带及岩体变形特征研究认为辽西地区中一晚侏罗世已处于伸展体制下, 苏鲁造山带南缘蚌埠地区中晚侏罗世岩浆活动也被认为处于弱伸展环境中(宋利宏等, 2016). 胶东地区此时也应处于伸展环境下. 因此认为, 伊泽奈奇板块俯冲形成弧后大陆在拉张环境下诱发重力不稳定或者岩石圈伸展造成加厚的造山带垮塌, 软流圈上涌的热输入导致大范围的造山带加厚地壳部分熔融, 晚侏罗世, 部分未经折返到中上地壳的扬子板片陆壳还残留于华北板块之下(杨德彬, 2009), 形成了源

区物质以扬子板块为主, 混染少量华北板块地壳的范家庄低镁埃达克质岩(图 12b)。

## 5 结论

(1) 锆石 U-Pb 年代学显示加权平均年龄为  $161 \pm 2$  Ma (MSWD=1.1), 显示侵位于晚侏罗世。

(2) 岩石地球化学特征显示富硅低镁、高 Sr 低 Y、Yb 含量的低镁埃达克质岩特征, 结合 Sr-Nd-Pb 同位素研究认为, 范家庄低镁埃达克质岩产生于增厚下地壳部分熔融, 岩浆源区显示以扬子板块下地壳物质组分为主, 混合华北板块下地壳成分的混合源区特征。

(3) 晚侏罗世伊泽奈奇板块俯冲形成的弧后拉伸岩石圈伸展造成加厚的造山带垮塌, 软流圈上涌导致加厚地壳部分熔融可能是形成胶东范家庄低镁埃达克岩的地球动力学背景。

致谢: 野外工作得到了山东省煤田地质规划勘察研究院工作人员的帮助和支持, 本科生李俊和刘扬璐协助了样品采集和准备过程, 在此一并致以诚挚的感谢! 最后, 感谢两名匿名审稿人提出的宝贵意见。

表格数据参见本刊官网: [www.earth-science.net](http://www.earth-science.net)

## References

- Atherton, M. P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust. *Nature*, 362(6416): 144–146. <https://doi.org/10.1038/362144a0>
- Castillo, P. R., Janney, P. E., Solidum, R. U., 1999. Petrology and Geochemistry of Camiguin Island, Southern Philippines: Insights to the Source of Adakites and other Lavas in a Complex Arc Setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33–51. <https://doi.org/10.1007/s004100050467>
- Cande, S. C., LaBrecque, J. L., Larson, R. L., et al., 1989. Map of Magnetic Lineations of the World's Ocean Basins (Scale 1:27 4 Million at the Equator). American Association of Petroleum Geologists, Tulsa.
- Cheng, H. Y., 2010. Genetic Mineralogy and Deep Prospects of Jinqingding Gold Deposit in Rushan, East Shandong Province (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. Z., Jiang, N., 2011. Petrogenesis of the Late-Triassic Alkaline Magmatism in the Jiaodong area: Evidence from U-Pb age, Hf-O Isotopes of Zircons. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3557–3574 (in Chinese with English abstract).
- Chen, S., Li, X. P., Duan, W. Y., et al., 2018. Petrological and Geochronological Study of Amphibolite from Jiaobei Terrane. *Earth Science*, 43(3): 716–732 (in Chinese with English abstract).
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662–665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Dewey, J. F., 1988. Extensional Collapse of Orogens. *Tectonics*, 7(6): 1123–1139. <https://doi.org/10.1029/tc007i006p01123>
- Ding, Z. J., Sun, F. Y., Liu, F. L., et al., 2015. Mesozoic Geodynamic Evolution and Metallogenic Series of Major Metal Deposits in Jiaodong Peninsula, China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 3045–3080 (in Chinese with English abstract).
- Feeley, T. C., Hacker, M. D., 1995. Intracrustal Derivation of Na-Rich Andesitic and Dacitic Magmas: An Example from Volcán Ollagüe, Andean Central Volcanic Zone. *The Journal of Geology*, 103(2): 213–225. <https://doi.org/10.1086/629737>
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892–897. <https://doi.org/10.1038/nature03162>
- Gao, T. Z., Yang, M. Z., Jin, C. Z., et al., 1999. Study on Fluid and Tectonodynamics of Quartz Vein-Type Gold Deposits in the Mouping-Rushan Gold Belt, Shandong Province, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 23(2): 130–136 (in Chinese with English abstract).
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131(3/4): 231–282. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.12.011>
- Hou, M. L., Jiang, Y. H., Jiang, S. Y., et al., 2007. Contrasting Origins of Late Mesozoic Adakitic Granitoids from the Northwestern Jiaodong Peninsula, East China: Implications for Crustal Thickening to Delamination. *Geological Magazine*, 144(4): 619–631. <https://doi.org/10.1017/s0016756807003494>
- Hu, J., Jiang, S. Y., Zhao, H. X., et al., 2012. Geochemistry and Petrogenesis of the Huashan Granites and their Implications for the Mesozoic Tectonic Settings in the Xiaqingling Gold Mineralization Belt, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 56: 276–289. <https://doi.org/>



- 10.1016/j.jseae.2012.05.016
- Huang, T., Yang, L. Q., Liu, X. D., et al., 2014. Crustal Evolution of the Jiaobei Terrane: Evidence from U-Pb Ages, Trace Element Compositions and Hf Isotopes of Inherited Zircons of the Linglong Biotite Granite. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2574—2594 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, N., Chen, J. Z., Guo, J. H., et al., 2012. In Situ Zircon U-Pb, Oxygen and Hafnium Isotopic Compositions of Jurassic Granites from the North China Craton: Evidence for Triassic Subduction of Continental Crust and Subsequent Metamorphism-Related  $^{18}\text{O}$  Depletion. *Lithos*, 142—143: 84—94. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.02.018>
- Kay, R. W., Kay, S. M., 1993. Delamination and Delamination Magmatism. *Tectonophysics*, 219(1/2/3): 177—189. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90295-u](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90295-u)
- Kay, S. M., Ramos, V. A., Marquez, M., 1993. Evidence in Cerro Pampa Volcanic Rocks for Slab—Melting Prior to Ridge-Trench Collision in Southern South America. *The Journal of Geology*, 101(6): 703—714. <https://doi.org/10.1086/648269>
- Kelemen, P. B., 1995. Genesis of High Mg# Andesites and the Continental Crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 120(1): 1—19. <https://doi.org/10.1007/s004100050054>
- Li, G., 2010. Characterist of Middle and Late Jurassic Crustal Extension in Yiwulushan Area, Western of Liaoning Province (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Li, J. W., Zhao, X. F., Zhou, M. F., et al., 2009. Late Mesozoic Magmatism from the Daye Region, Eastern China: U-Pb Ages, Petrogenesis, and Geodynamic Implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(3): 383—409. <https://doi.org/10.1007/s00410-008-0341-x>
- Liang, Q., Jing, H., Gregoire, D. C., 2000. Determination of Trace Elements in Granites by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Talanta*, 51(3): 507—513. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(99\)00318-5](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(99)00318-5)
- Liang, X. R., Wei, G. J., Li, X. H., et al., 2003. Precise Measurement of  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  and Sm/Nd Ratios Using Multiple-Collectors Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer (MC-ICPMS). *Geochimica*, 32(1): 91—96 (in Chinese with English abstract).
- Lin, B. L., Li, B. Y., 2013. Geochemistry, U-Pb Dating, Lu-Hf Isotopic Analysis and Geological Significance of Linglong granite in Jiaodong Peninsula. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 40(2): 147—160 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34—43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Liu, Y., Gao, S., Hu, Z., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling - Induced Melt - Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1/2): 537—571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Liu, Z. B., 2010. A Geochemical Study of Postcollisional Adakitic Granitoids in the Dabie Orogeny (Dissertation). University of Science and Technology of China, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Ma, L., Jiang, S. Y., Dai, B. Z., et al., 2013. Multiple Sources for the Origin of Late Jurassic Linglong Adakitic Granite in the Shandong Peninsula, Eastern China: Zircon U-Pb Geochronological, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Evidence. *Lithos*, 162—163: 251—263. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.01.009>
- Macpherson, C. G., Dreher, S. T., Thirlwall, M. F., 2006. Adakites without Slab Melting: High Pressure Differentiation of Island Arc Magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3/4): 581—593. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.12.034>
- Miao, L. C., Luo, Z. K., Guan, K., et al., 1998. The Implication of the SHRIMP U-Pb Age in Zircon to the Petrogenesis of the Linglong Granite, East Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2): 198—206 (in Chinese with English abstract).
- Moore, G. W., 1989. Mesozoic and Cenozoic Paleogeographic Development of the Pacific Region. Abstracts, of 28th International Geological Congress, 2-455-456. Washington DC, USA.
- Moyen, J. F., 2009. High Sr/Y and La/Yb Ratios: The Meaning of the “Adakitic Signature”. *Lithos*, 112(3/4): 556—574. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.001>
- Muir, R. J., Weaver, S. D., Bradshaw, J. D., et al., 1995. The Cretaceous Separation Point Batholith, New Zealand: Granitoid Magmas Formed by Melting of Mafic Lithosphere. *Journal of the Geological Society*, 152(4): 689—701. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.152.4.0689>
- Petford, N., Atherton, M., 1996. Na-Rich Partial Melts from Newly Underplated Basaltic Crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37(6): 1491—

1521. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.6.1491>
- Qiu, Y. M., Groves, D. I., McNaughton, N. J., et al., 2002. Nature, Age, and Tectonic Setting of Granitoid-Hosted, Orogenic Gold Deposits of the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton, China. *Mineralium Deposita*, 37(3): 283–305. <https://doi.org/10.1007/s00126-001-0238-3>
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8–32 Kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891>
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D., et al., 1999. Reaction between Slab-Derived Melts and Peridotite in the Mantle Wedge: Experimental Constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335–356. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(99\)00106-0](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(99)00106-0)
- Rapp, R. P., Xiao, L., Shimizu, N., 2002. Experimental Constraints on the Origin of Potassium-Rich Adakites in Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 293–302. [https://doi.org/10.1007/s11434-002-018\(03\)-0293-02](https://doi.org/10.1007/s11434-002-018(03)-0293-02)
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. In: Rudnick, R. L. (Ed), The Crust. In: Holland, H. D., Turekian, K. K., eds. Treatise on Geochemistry. Elsevier-Pergamon, Oxford, 1–64.
- Sai, S. X., Zhao, T. M., Wang, Z. L., et al., 2016. Petrogenesis of Linglong Biotite Granite: Constraints from Mineralogical Characteristics. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2477–2493 (in Chinese with English abstract).
- Sen, C., Dunn, T., 1994. Dehydration Melting of a Basaltic Composition Amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: Implications for the Origin of Adakites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117(4): 394–409. <https://doi.org/10.1007/bf00307273>
- Seton, M., Müller, R. D., 2008. Reconstructing the Junction between Panthalassa and Tethys Since the Early Cretaceous. In: PESA Eastern Australasian Basins Symposium III. Sydney, 263–266.
- Song, L. H., Zhu, G., Zhao, T., et al., 2016. Deformation Records in Late Mesozoic Plutons in the Bengbu Uplift in the Southeastern North China Craton and Their Tectonic Implications. *Geological Review*, 62(2): 400–418. (in Chinese with English abstract).
- Stern, C. R., Kilian, R., 1996. Role of the Subducted Slab, Mantle Wedge and Continental Crust in the Generation of Adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 263–281. <https://doi.org/10.1007/s004100050155>
- Sun, L. Q., Ling, H. F., Zhao, K. D., et al., 2017. Petrogenesis of Early Cretaceous Adakitic Granodiorite: Implication for a Crust Thickening Event within the Cathaysia Block, South China. *Science China Earth Sciences*, 60: 1237–1255 (in Chinese).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. Geological Society. London, *Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., et al., 2007. Early Cretaceous Adakitic Granites in the Northern Dabie Complex, Central China: Implications for Partial Melting and Delamination of Thickened Lower Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(10): 2609–2636. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.03.008>
- Wang, S. J., Wan, Y. S., Guo, R. P., et al., 2011. SHRIMP Zircon Dating of Linglong Type (Superunit) Granite in Eastern Shandong Province. *Land and Resources in Shandong Province*, 27(4): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. L., Zhao, R. X., Zhang, Q., et al., 2014. Magma Mixing for the High Ba-Sr Guojialing-Type Granitoids in Northwest Jiaodong Peninsula: Constraints from Petrogeochemistry and Sr-Nd Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2595–2608 (in Chinese with English abstract).
- Wareham, C. D., Millar, I. L., Vaughan, A. P. M., 1997. The Generation of Sodic Granite Magmas, Western Palmer Land, Antarctic Peninsula. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128(1): 81–96. <https://doi.org/10.1007/s004100050295>
- Xie, Z., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., et al., 2006. Mineral Isotope Evidence for the Contemporaneous Process of Mesozoic Granite Emplacement and Gneiss Metamorphism in the Dabie Orogen. *Chemical Geology*, 231(3): 214–235. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.01.028>
- Xiao, Q. H., Li, Y., Feng, Y. F., et al., 2010. A Preliminary Study of the Relationship between Mesozoic Lithosphere Evolution in Eastern China and the Subduction of the Pacific. *Geology in China*, 37(4): 1092–1101. (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. L., Zhang, D. Q., Sun, G. Y., 1997. Characteristics and Genesis of Kunyushan Granite and Its Relation with Gold Deposits in Jiaodong. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(2): 131–143 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. F., Wu, J. B., Wang, Q., et al., 2014. Research Ad-

- vances of Adakites and Adakitic Rocks in China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(1): 6—13(in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Hergt, J. M., Gao, S., et al., 2008. Interaction of Adakitic Melt-Peridotite: Implications for the High-Mg# Signature of Mesozoic Adakitic Rocks in the Eastern North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 265(1/2): 123—137. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.09.041>
- Xu, W. L., Wang, Q. H., Wang, D. Y., et al., 2006. Mesozoic Adakitic Rocks from the Xuzhou - Suzhou Area, Eastern China: Evidence for Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(2): 230—240. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2005.03.005>
- Yang, D. B., 2009. Chronology and Geochemistry of Granitoids in Bengbu Uplift, Central China: Constraints on Tectonic Evolution in the Eastern North China Craton (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. B., Xu, W. L., Pei, F. P., et al., 2012a. Spatial Extent of the Influence of the Deeply Subducted South China Block on the Southeastern North China Block: Constraints from Sr-Nd-Pb Isotopes in Mesozoic Mafic Igneous Rocks. *Lithos*, 136—139: 246—260. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.06.004>
- Yang, K. F., Fan, H. R., Santosh, M., et al., 2012b. Reactivation of the Archean Lower Crust: Implications for Zircon Geochronology, Elemental and Sr-Nd-Hf Isotopic Geochemistry of Late Mesozoic Granitoids from Northwestern Jiaodong Terrane, the North China Craton. *Lithos*, 146—147: 112—127. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.04.035>
- Zhang, Q., Jin, W. J., Xiong, X. L., et al. 2009. Characteristics and Implication of O-Type Adakite in China during different Geological Periods. *Geotectonica et Metallogenia*, 33 (3): 433—447 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., 2011. A Geochemical study of Mesozoic Magmatic Rocks in the Sulu Orogen (Dissertation). University of Science and Technology of China, Hefei(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. *Lithos*, 119(3/4): 512—536. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.08.005>
- Zhang, L. C., Wu, H. Y., Wan, B., et al., 2009. Ages and Geodynamic Settings of Xilamulun Mo - Cu Metallogenic Belt in the Northern Part of the North China Craton. *Gondwana Research*, 16(2): 243—254. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.04.005>
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., 2009. Remelting of Subducted Continental Lithosphere: Petrogenesis of Mesozoic Magmatic Rocks in the Dabie-Sulu Orogenic Belt. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(9): 1295—1318. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0134-8>
- Zheng, Y. F., 2008. A Perspective View on Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Continental Collision in the Dabie-Sulu Orogenic Belt. *Science Bulletin*, 53(20): 3081—3104. <https://doi.org/10.1007/s11434-008-0388-0>
- Zhou, X. H., Yang, J. H., Zhang, L. C., et al., 2002. Metallogenesis of Superlarge Gold Deposits in Jiaodong Region and Deep Processes of Subcontinental Lithosphere Beneath North China Craton in Mesozoic. *Science in China (Series D)*, 32(s1): 11—20(in Chinese).

#### 附中文参考文献

- 陈爽, 李旭平, 段文勇, 等, 2018. 胶北地块斜长角闪岩的岩石学与年代学研究. *地球科学*, 43(3): 716—732.
- 陈海燕, 2010. 胶东金青顶金矿成因矿物学与深部远景研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 陈竟志, 姜能, 2011. 胶东晚三叠世碱性岩浆作用的岩石成因——来自锆石 U-Pb 年龄、Hf-O 同位素的证据. *岩石学报*, 27(12): 3557—3574.
- 丁正江, 孙丰月, 刘福来, 等, 2015. 胶东中生代动力学演化及主要金属矿床成矿系列. *岩石学报*, 31(10): 3045—3080.
- 高太忠, 杨敏之, 金成洙, 等, 1999. 山东牟乳石英脉型金矿流体成矿构造动力学研究. *大地构造与成矿学*, 23(2): 130—136.
- 黄涛, 杨立强, 刘向东, 等, 2014. 胶北地体地壳演化: 玲珑黑云母花岗岩继承锆石 U-Pb 年龄、微量元素和 Hf 同位素证据. *岩石学报*, 30(9): 2574—2594.
- 李刚, 2010. 辽西医巫闾山地区中、晚侏罗世地壳伸展作用的特征(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 等, 2003. 利用 MC-ICP MS 精确测定  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  和 Sm/Nd 比值. *地球化学*, 32(1): 91—96.
- 林博磊, 李碧乐, 2013. 胶东玲珑花岗岩的地球化学、U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素及地质意义. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 40(2): 147—160.
- 刘质彬, 2017. 大别造山带碰撞后埃达克质花岗岩地球化学研究(硕士学位论文). 合肥: 中国科学技术大学.
- 苗来成, 罗镇宽, 关康, 等, 1998. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱 U-Pb 年龄及其岩石学意义. *岩石学报*, 14(2):

- 198—206.
- 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. 岩石学报, 32(8): 2477—2493.
- 宋利宏, 朱光, 赵田, 等, 2016. 华北克拉通东南部蚌埠隆起晚中生代花岗岩类岩体内变形记录与构造意义. 地质论评, 62(2): 400—418.
- 孙立强, 凌洪飞, 赵葵东, 等, 2017. 华夏地块早白垩世埃达克质岩的岩石成因及地质意义. 中国科学: 地球科学, 47(7): 783—803.
- 王世进, 万渝生, 郭瑞朋, 等, 2011. 鲁东地区玲珑型(超单元)花岗岩的锆石 SHRIMP 定年. 山东国土资源, 27(4): 1—7.
- 王中亮, 赵荣新, 张庆, 等, 2014. 胶西北高 Ba-Sr 郭家岭型花岗岩岩浆混合成因: 岩石地球化学与 Sr-Nd 同位素约束. 岩石学报, 30(9): 2595—2608.
- 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. 岩石矿物学杂志, 16(2): 131—143.
- 肖庆辉, 刘勇, 冯艳芳, 等, 2010. 中国东部中生代岩石圈演化与太平洋板块俯冲消减关系的讨论. 中国地质, 37(4): 1092—1101.
- 许继峰, 邬建斌, 王强, 等, 2014. 埃达克岩与埃达克质岩在中国的研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 33(1): 6—13.
- 杨德彬, 2009. 蚌埠隆起区花岗岩的年代学和地球化学: 对华北克拉通东部构造演化的制约(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 张旗, 金惟俊, 熊小林, 等, 2009. 中国不同时代 O 型埃达克岩的特征及其意义. 大地构造与成矿学, 33(3): 433—447.
- 张娟, 2011. 苏鲁造山带中生代岩浆岩地球化学研究(博士学位论文). 合肥: 中国科学技术大学.
- 周新华, 杨进辉, 张连昌, 2002. 胶东超大型金矿的形成与中生代华北大陆岩石圈深部过程. 中国科学: 地球科学, 32(s1): 11—20.



表 3 胶东范家庄地区花岗岩全岩 Sr- Nd-Pb 同位素分析结果

Table 3 Sr-Nd-Pb compositions of the Fanjiazhuanggranite from Shandong Peninsula

岩石类型	样品编号	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ r	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ d	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ d	$\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ )	$T_{\text{DM2}}(\text{Ga})$ )	$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$
范家庄 花岗岩	FJZ10-1	0.286 4	0.709 936	0.000 005	0.709 28	0.080 7	0.511 729	0.000 002	-14. 1	2.19	17.256	15.497	37.843
	FJZ10-2	0.345 9	0.712 082	0.000 004	0.711 29	0.093 0	0.511 440	0.000 002	-20. 1	2.67	16.914	15.441	37.535
	FJZ10-3	0.279 9	0.711 935	0.000 004	0.711 30	0.093 7	0.511 423	0.000 002	-20. 5	2.69	16.946	15.449	37.612
	FJZ10-4	0.277 2	0.712 048	0.000 005	0.711 41	0.083 3	0.511 421	0.000 002	-20. 2	2.68	16.957	15.449	37.636
	FJZ10-5	0.244 1	0.711 764	0.000 004	0.711 21	0.087 0	0.511 432	0.000 002	-20. 1	2.67	16.938	15.442	37.611
	FJZ10-6	0.279 3	0.711 913	0.000 008	0.711 27	0.074 9	0.511 412	0.000 002	-20. 1	2.68	16.901	15.438	37.504

注:  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 参数的计算使用的是全岩的Rb、Sr、Sm和Nd微量元素含量;  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值计算采用 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.1967$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512638$ , 计算公式为  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1] \times 10000$ ;  $t$ 代表成岩年龄(161 Ma); 同位素亏损地幔模式年龄( $T_{\text{DM2}}$ )计算采用 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.2137$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.51315$ ;  $\lambda_{\text{Rb}}=1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{Sm}}=6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$ .全岩铅同位素校正到161 Ma.