

doi: 10.12029/gc20220521

宋运红, 杨凤超, 郝立波, 闫国磊, 赵东芳, 张哲寰. 2022. 辽东凤凰山正长花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征与陆内伸展作用[J]. 中国地质, 49(5): 1687-1698.

Song Yunhong, Yang Fengchao, Hao Libo, Yan Guolei, Zhao Dongfang, Zhang Zhehuan. 2022. SHRIMP U-Pb age, geochemical characteristics and its introcontinental extension of Fenghuangshan syenogranite in the east Liaoning[J]. Geology in China, 49(5): 1687-1698(in Chinese with English abstract).

# 辽东凤凰山正长花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征与陆内伸展作用

宋运红<sup>1</sup>, 杨凤超<sup>1</sup>, 郝立波<sup>2</sup>, 闫国磊<sup>1</sup>, 赵东芳<sup>1</sup>, 张哲寰<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130061)

**摘要:**【研究目的】辽宁丹东地区发育着一期 A 型花岗岩, 因其特殊的成因演化, 特定的构造背景及其重要的地球动力学意义而备受关注。【研究方法】本文通过对辽宁丹东凤凰山岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学特征的分析, 探讨了该岩体形成时代、岩石成因及地球动力学背景。【研究结果】辽东凤凰山黑云母正长花岗岩锆石 U-Pb 年龄分别为 (122.3±1.7)Ma、(125.0±1.7)Ma、(122±2)Ma, 代表岩浆结晶年龄, 凤凰山正长花岗岩侵位时代属于早白垩世。地球化学分析结果显示, SiO<sub>2</sub> 含量为 65.65%~73.62%, K<sub>2</sub>O 为 3.52%~5.76%, Na<sub>2</sub>O 为 3.64%~4.26%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 13.4%~15.49%, A/CNK 值 1.02~1.46, 属铝过饱和型。碱度率 AR 在 2.71~5.13, 基本在铝质 A 型花岗岩 AR 值范围内, FeO/MgO 比值为 4.69~18.05, 表现为 A 型花岗岩的 A1 和 A2 过渡类型。Rb/Nb 比值为 6.02~8.64, 明显高于大陆壳的 Rb/Nb 比值 2.2~4.7, 说明陆壳物质对岩体成岩影响较大, 从而导致 Rb 的含量增加。相对富集大离子亲石元素 Rb、Th, Zr、Hf, 亏损 Sr、P、Ba、Ti、Nb。稀土总量较高, 轻重稀土之间的分馏不明显, Eu 具明显的负异常。【结论】综上, 凤凰山正长花岗岩可能产生于陆内剪切相关的伸展环境, 应为自中侏罗世开始由板块俯冲引起的东亚大陆边缘构造过程的响应。

**关键词:** 正长花岗岩; 锆石 SHRIMP U-Pb; 早白垩世; 地质调查工程; 凤凰山岩体; 辽东

**创新点:** 辽宁丹东地区凤凰山黑云母正长花岗岩属于早白垩世 A 型花岗岩, 综合分析认为该花岗岩可能产生于陆内剪切相关的伸展环境, 应为自中侏罗世开始由板块俯冲引起的东亚大陆边缘构造过程的响应。

中图分类号: P588.121; P597.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)05-1687-12

## SHRIMP U-Pb age, geochemical characteristics and its introcontinental extension of Fenghuangshan syenogranite in the east Liaoning

SONG Yunhong<sup>1</sup>, YANG Fengchao<sup>1</sup>, HAO Libo<sup>2</sup>, YAN Guolei<sup>1</sup>,  
ZHAO Dongfang<sup>1</sup>, ZHANG Zhehuan<sup>1</sup>

(1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China; 2. College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China)

**Abstract:** This paper is the result of the geological survey engineering.

收稿日期: 2019-09-20; 改回日期: 2022-09-17

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20221779, DD20190520) 资助。

作者简介: 宋运红, 女, 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 地球化学专业, 主要从事地球化学调查及研究工作; E-mail: yunhong408@163.com。

**[Objective]** A period of A-type granite is developed in Dandong, Liaoning Province, which has been widely concerned because of its special genetic evolution, specific tectonic setting and important geodynamic significance. **[Methods]** In this paper, the SHRIMP zircon U-Pb chronology and petrogeochemical characteristics of the Fenghuangshan pluton in Dandong, Liaoning Province, were analyzed to explore the formation age, petrogenesis and geodynamic background of the pluton. **[Results]** The zircon U-Pb ages of the biotite syenogranite in Fenghuangshan, Liaodong are  $(122.3 \pm 1.7)$  Ma,  $(125.0 \pm 1.7)$  Ma and  $(122 \pm 2)$  Ma, representing that the magma of the biotite syenogranite in Fenghuangshan crystallized and intruded in the Early Cretaceous. Geochemical analysis shows that the  $\text{SiO}_2$  content is 65.65%–73.62%, whereas that of  $\text{K}_2\text{O}$  and  $\text{Na}_2\text{O}$  is 3.52%–5.76% and 3.64%–4.26%, respectively. They also contain 13.4%–15.49% of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , with A/CNK ratio of 1.02–1.46, indicative of their peraluminous nature. The alkalinity rate (*AR*) ranges from 2.71 to 5.13, and this range is within the *AR* of aluminous A-type granites. Its  $\text{FeO}/\text{MgO}$  ranges from 4.69 to 18.05, which shows the A1 and A2 transition types of A-type granites. The  $\text{Rb}/\text{Nb}$  ranges from 6.02 to 8.64, which display a higher level than that of the continental crust of 2.2–4.7. This implies that continental crust components, which lead to an increase in Rb content, had a significant influence on its formation. The biotite syenogranites are relatively enriched in large ion lithophile elements Rb, Th, Zr, Hf, and depleted in Sr, P, Ba, Ti, Nb. The total content of rare earth elements is high, the fractionation between light and heavy rare earth elements is not obvious, and Eu has obvious negative anomalies. **[Conclusions]** In summary, Fenghuangshan pluton might have been produced in stretching environment related to intracontinental shearing, which ought to be a response to the tectonization of the East Asia continental margins caused by the subduction of plates starting from the Middle Jurassic.

**Key words:** syenogranite; zircon SHRIMP U-Pb; Early Cretaceous; geological survey engineering; Fenghuangshan pluton; East Liaoning

**Highlights:** The Fenghuangshan biotite syenogranite in Dandong, indicative of typical A-type granites, emplaced in Early Cretaceous. The comprehensive analysis suggests that Fenghuangshan pluton might have been produced in stretching environment related to intracontinental shearing, which ought to be a response to the tectonization of the East Asia continental margins caused by the subduction of plates starting from the middle Jurassic period.

**About the first author:** SONG Yunhong, female, born in 1983, senior engineer, mainly engaged in geochemical investigation and research work; E-mail: yunhong408@163.com.

**Fund support:** Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20221779, No. DD20190520).

## 1 引 言

花岗岩是构成大陆地壳的重要组成部分,是大陆形成和演化的标志物之一,可以在各种不同的地球动力学背景下形成(Barbarin, 1990, 1999; Bonin et al., 1998)。地球上大面积出露的花岗岩主要类型为I型和S型(杨凤超等, 2015, 2016; 2018; 2020; 宋运红等, 2015; 2016), A型相对较少,但由于A型花岗岩具有独特的地球化学特征并且蕴涵着地球动力学的重要信息,对推断造山后、板内非造山或者地幔热柱伸展等区域构造发展演化背景具有重要的指示意义(Eby, 1990, 1992; Wu et al., 2002; Yang et al., 2008; 孙金凤和杨进辉, 2009; 杨仲杰, 2021; 赵岩等, 2022)。

在华北克拉通东部,辽宁丹东地区发育着一期早白垩世A型花岗岩,前人认为这些花岗岩主要形

成于中生代的印支—早燕山期,但新的年代学资料却显示,它们主要发育在早白垩世(Wu et al., 2005)。对本期次花岗岩的系统研究有助于准确划分凤凰山正长花岗岩形成的时代和类型,以及探讨辽东地区乃至东北地区的造山作用,包括岩石圈减薄、岩浆底侵和地壳伸展作用等深部动力学问题具有重要意义,因此得到了广泛的关注(Wu et al., 2005; Yang et al., 2006)。陆续发现了以四平街岩体为代表的过碱性A型花岗岩(Wu et al., 2005)和以千山岩体为代表的过铝质A型花岗岩(杨进辉等, 2004; Yang et al., 2006)。但是缺乏系统的对比研究,不清楚它们的类型是否一致。基于此,在前人研究的基础上,本文重点解剖了辽东地区凤凰山A型花岗岩岩体(图1),通过SHRIMP锆石U-Pb年代学、岩石地球化学特征研究,对该岩体的形成时代、岩石类型及成因、地球动力学背景加以探讨,为辽

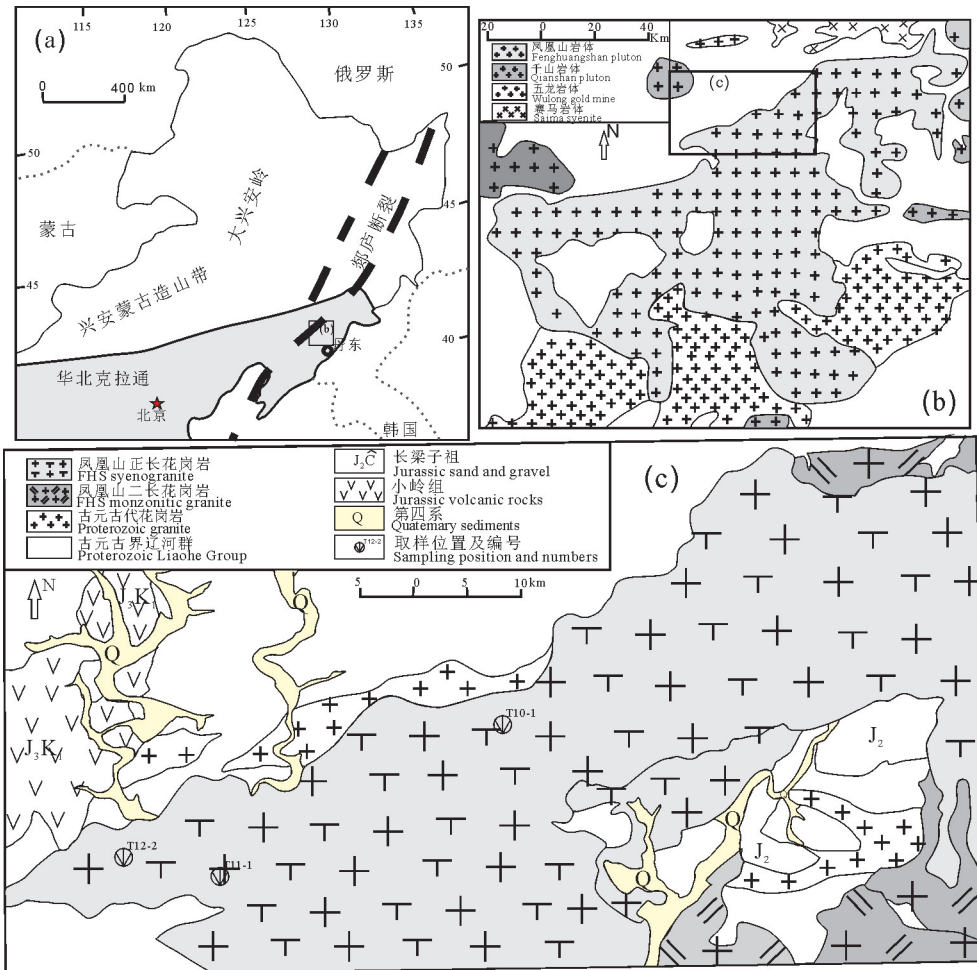


图1 中国东部主要构造单元图(a)、辽东凤凰山岩体地质简图(b)及采样位置图(c)

Fig.1 Simplified geological map of eastern China, showing major tectonic units (a), geological map of the Fenghuangshan pluton in the Liaodong Peninsula (b) and geological map of sampling location map(c)

东地区的构造演化提供一定的证据。

## 2 地质特征

中国东部自北向南由兴安—蒙古(兴蒙)造山带、华北克拉通,大别—苏鲁造山带,扬子克拉通和华南克拉通组成。

研究区位于华北陆块东部,是中国东部中生代岩浆作用比较发育的地区之一(林景仟等,1992)。辽东地区早白垩世侵入岩分布在研究区北部隆昌、东部大洼、凤城等地。以A型花岗岩为主,区域上构成近东西向A型花岗岩带,其他成因类型的花岗岩零星分布。凤凰山正长花岗岩即为其中典型的一个A型花岗岩。

辽东凤凰山正长花岗岩主要分布在凤城市东北部,出露面积约300多平方千米。区域上,凤凰山

岩体由黑云母正长花岗岩、二长花岗岩组成,区域分布表现为以黑云母正长花岗岩为中心,边缘过渡为二长花岗岩,侵位于变形的太古宙片麻岩和元古宙花岗岩中。由于独特的花岗岩风化地貌,而构成凤凰山著名的名胜风景区(图1)。

## 3 样品特征及分析方法

### 3.1 岩相学特点

岩石样品为野外采集的新鲜凤凰山黑云母正长花岗岩,岩相学特征如下:

黑云母正长花岗岩肉眼观察:肉红色,细中粒花岗结构,块状构造。主要由碱性长石、石英(>25%)及少量斜长石和黑云母(含量>5%)组成(图2a)。

黑云母正长花岗岩岩相学特征如下:中粒花岗结构,由中粒板柱状、柱粒状碱性长石和粒状石英

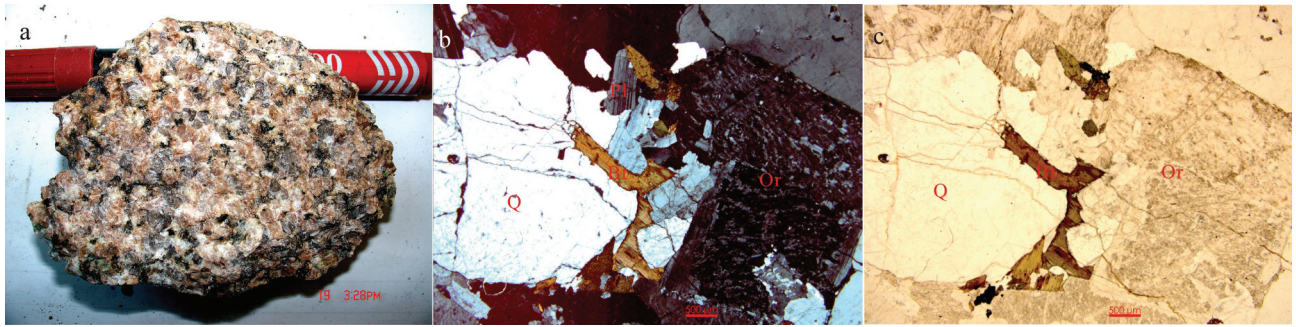


图2 辽东凤凰山岩体黑云母正长花岗岩

岩石标本照片(a)、正交偏光(b)、单偏光(c)下的显微镜照片,Q—石英;Or—正长石;Bt—黑云母;Pl—斜长石

Fig. 2 Biotite syenogranite sampled from Fenghuangshan pluton in Dandong, Liaoning Province

rock specimen (a), photo under crossed polarized light (b), photo under single polaroid glass (c), Q—Quartz; Or—Orthoclase; Bt—Biotite; Pl—Plagioclase

及少量斜长石、黑云母构成。其中碱性长石结晶程度不如斜长石,但含量远远多于斜长石。碱性长石主要见微纹长石和正长石,具土化次生变化、呈浅黄色糙面,粒度 $\leq 2.8\text{ mm} \times 4.0\text{ mm}$ ,含量高达60%;石英,他形粒状,无色透明,微弱波状消光,粒度 $\leq 4.0\text{ mm}$ ,含量约25%以上;斜长石,板柱状,较洁净,发育聚片双晶, $NP \wedge (010) < 8^\circ$ ,为更长石,粒度 $\leq 0.7\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ ,含量 $< 10\%$ ;暗色矿物黑云母,富铁深褐色,具典型黑云母式吸收性,粒度 $\leq 0.2\text{ mm} \times 1.6\text{ mm}$ ,含量 $5\% \pm$ (图2b、c)。

### 3.2 锆石 SHRIMP U—Pb 定年

SHRIMP U—Pb 定年样品取自辽东地区新鲜的凤凰山黑云母正长花岗岩(T10-1, GPS 坐标:  $124^\circ 12' 31''\text{E}$ ,  $40^\circ 45' 53''\text{N}$ ; T11-1, GPS 坐标:  $124^\circ 7' 59''\text{E}$ ,  $40^\circ 41' 39''\text{N}$ ; T12-2, GPS 坐标:  $124^\circ 2' 30''\text{E}$ ,  $40^\circ 42' 30''\text{E}$ ),样品经重液分离和磁选后,挑选代表性的锆石制作样品靶。在 SHRIMP U—Pb 分析前,进行了透、反射电子像(BSE)及阴极发光(CL)分析,以确定锆石颗粒的晶体形态、内部结构以及标定测年点。辽东凤凰山黑云母正长花岗岩锆石多浅黄色,个别为浅褐色和浅紫色,金刚光泽,主要为透明一半透明,少数具浅色或暗色矿物包体,极少数具裂纹或铁染,晶体多为不规则粒状,阴极发光图像显示锆石具有较典型的岩浆振荡环带结构(生长环带),应为岩浆成因,为原岩结晶锆石。

锆石的 U、Th 和 Pb 同位素组成分析在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心的 SHRIMP II 上进行,分析流程和原理参见文献(Williams, 1998; 宋彪等, 2002)的相关描述。应用

澳大利亚地质调查局标准锆石 TEMORA(417 Ma)进行元素之间的分馏校正。Pb/U 校正公式采用  $Pb/U = A(UO/U)^2$  (Claoue—Long et al., 1995)。应用置于调试靶上的另一标准锆石 SL13(年龄为 572 Ma, U 含量为  $238 \times 10^{-6}$ )标定锆石的 U、Th 和 Pb 含量。应用澳大利亚国立大学 PRAWN 程序进行数据处理(Williams et al., 1996)。普通铅根据实测  $^{204}\text{Pb}$  校正,数据点的误差为  $1\sigma$ 。采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄,其加权平均值的误差为  $2\sigma$ ,置信度为 95%。

### 3.3 主微量元素测试

对新鲜的凤凰山黑云母正长花岗岩样品进行了主、微量元素测试工作。测试工作在自然资源部东北矿产资源监督检测中心完成。主量元素测试方法为 X 射线荧光光谱法测定。测试仪器为飞利浦 PW2404X 射线荧光光谱仪,分析精度优于 5%。微量元素利用酸溶法制备样品并在 HR—ICPMS (Element I)电感耦合等离子体质谱测试。分析精度为:当元素含量大于  $10 \times 10^{-6}$ ,精度优于 5%,当含量小于  $10 \times 10^{-6}$  时,精度优于 10%。

## 4 分析结果

### 4.1 锆石 SHRIMP U—Pb 年代学

辽东凤凰山黑云母正长花岗岩的锆石 SHRIMP U—Pb 年龄分析结果见表 1。显微镜和锆石透反射观察显示,黑云母正长花岗岩锆石呈自形晶,较小,长  $50 \sim 200\ \mu\text{m}$ ,长短轴比主要分布在  $1:1 \sim 1:2$ 。阴极发光(CL)图像显示锆石均发育振荡环带。锆石微量元素测试数据显示,凤凰山黑云母正长花岗岩锆石  $U = 82 \times 10^{-6} \sim 1279 \times 10^{-6}$ ,  $Th = 56 \times$

$10^{-6} \sim 1125 \times 10^{-6}$ , Th/U=0.41 ~ 0.98。样品锆石 Th/U 均大于 0.1, 也表明了黑云母正长花岗岩锆石为岩浆成因锆石(Belousova et al., 2002), 结合振荡环带和锆石的 U、Th 含量可以判断锆石均为岩浆锆石。

黑云母正长花岗岩锆石 U-Pb 谐和年龄图上样

品所有点均落在 U-Pb 谐和线附近(图 3), 经过普通铅校正以后, 以  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  计算(误差为  $2\sigma$ ) 得到加权平均年龄分别为  $(122.3 \pm 1.7)\text{Ma}$ 、 $(125.0 \pm 1.7)\text{Ma}$ 、 $(122 \pm 2)\text{Ma}$ , 代表黑云母正长花岗岩的结晶年龄, 时代属于早白垩世, 表明其为燕山晚期岩浆活动产

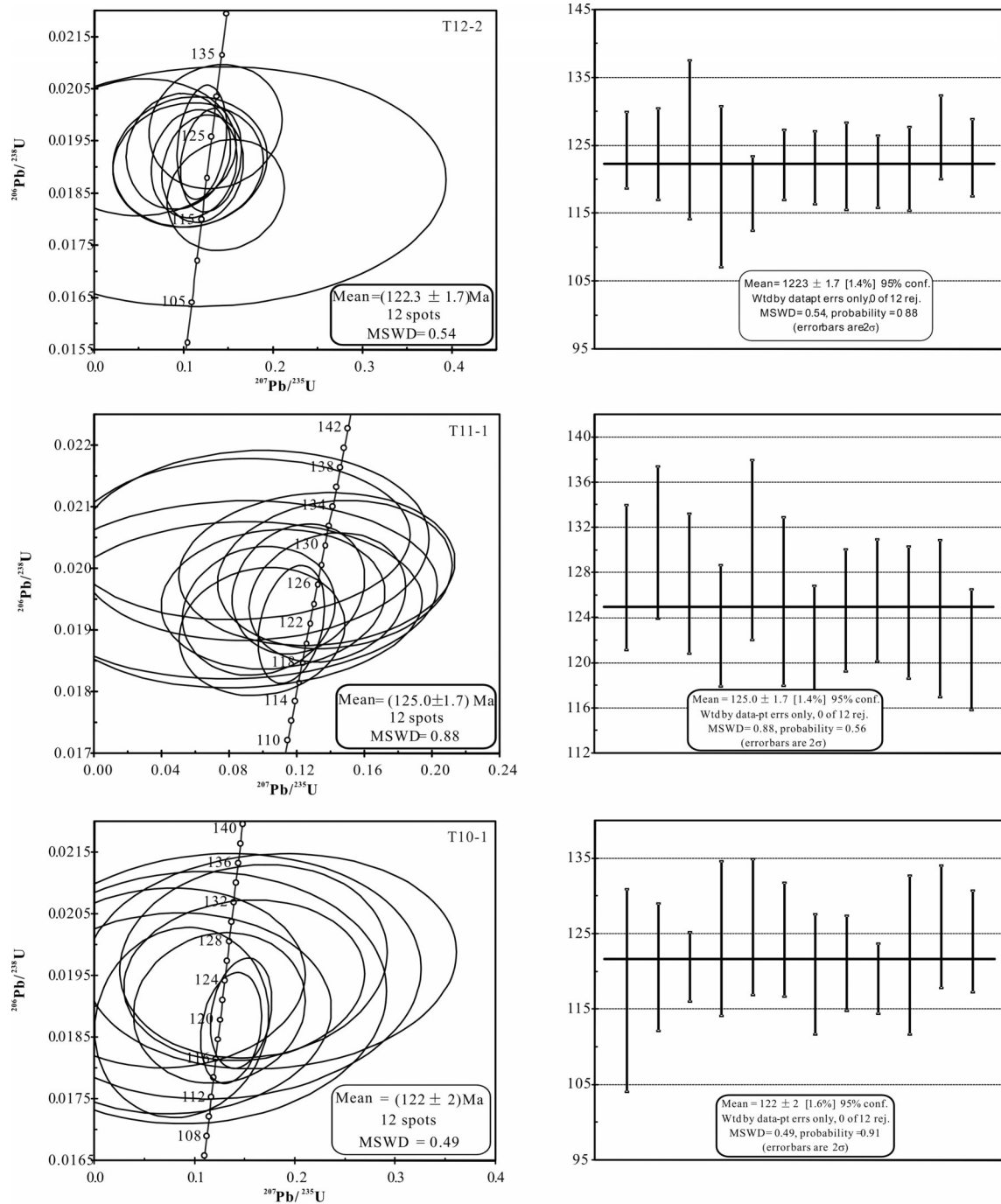


图3 辽东凤凰山黑云母正长花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄

Fig. 3 SHRIMP zircon U-Pb concordia diagram and average age of the syenogranites sampled from Fenghuangshan pluton in Dandong, Liaoning Province

表1 辽东凤凰山黑云母正长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年数据  
Table 1 SHRIMP U-Pb dating of the syenogranite sampled in the Fenghuangshan pluton

测点号	U/Th		Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±%	<sup>207</sup> Pb*/ <sup>235</sup> U	±%	<sup>206</sup> Pb*/ <sup>238</sup> U	±%	年龄/Ma				
	10 <sup>-6</sup>									<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th		
T12-2-1	768	901	1.21	0.061	2.1	0.191	2.9	0.020	2.2	125.0 ±2.8	-76	±220	107	±4.5
T12-2-2	296	182	0.64	0.083	9.8	0.134	18	0.020	2.2	128.3 ±3.1	-2730	±3700	81	±24
T12-2-3	209	150	0.74	0.111	14			0.020	2.4	128.3 ±4.0			106	±48
T12-2-4	246	176	0.74	0.107	19	0.148	39	0.019	2.4	118.7 ±4.3	220	±1900	110	±49
T12-2-5	675	1125	1.72	0.103	4.9	0.182	7.8	0.019	2.1	116.6 ±2.5	518	±400	112.2	±6.3
T12-2-6	545	764	1.45	0.062	4.7	0.133	6.2	0.019	2.1	122.1 ±2.5	164	±250	121.5	±4.5
T12-2-7	426	488	1.18	0.063	6.6	0.141	8.2	0.019	2.1	122.7 ±2.6	-209	±440	114.2	±6.1
T12-2-8	292	199	0.70	0.070	7.1	0.114	12	0.019	2.2	123.2 ±2.8	-323	±850	118	±18
T12-2-9	553	644	1.20	0.060	5.2	0.143	6.1	0.019	2.1	121.5 ±2.5	8	±370	115.7	±6.1
T12-2-10	464	505	1.13	0.073	8.1	0.139	12	0.019	2.1	122.9 ±2.7	-359	±850	112	±11
T12-2-11	241	145	0.62	0.076	8.2	0.130	14	0.020	2.2	126.1 ±2.9	176	±520	128	±17
T12-2-12	451	460	1.06	0.062	3.6	0.140	4.9	0.020	2.1	125.3 ±2.6	-694	±700	109.9	±9.3
T11-1-1	294	118	0.41	0.100	4.0	0.158	7.8	0.020	2.1	129.2 ±3.3	88	±600	104	±32
T11-1-2	169	72	0.44	0.086	11	0.129	21	0.021	2.2	133.2 ±3.8	-1,100	±1400	96	±30
T11-1-3	373	176	0.49	0.082	9.6	0.140	16	0.020	2.3	127.0 ±3.5	280	±450	127	±17
T11-1-4	462	259	0.58	0.067	3.9	0.135	5.8	0.020	2.1	125.5 ±3.0	-592	±510	101	±12
T11-1-5	138	86	0.64	0.094	2.9	0.137	6.7	0.021	2.5	132.6 ±4.0	-850	±1300	106	±26
T11-1-6	307	158	0.53	0.075	5.5	0.138	8.8	0.020	2.1	128.5 ±3.1	-1,070	±1800	91	±34
T11-1-7	1279	661	0.53	0.054	1.4	0.133	2.5	0.019	2.0	122.8 ±2.7	-94	±160	111.9	±6.0
T11-1-8	635	507	0.82	0.064	4.6	0.140	6.2	0.020	2.0	124.8 ±3.0	251	±310	123.7	±8.8
T11-1-9	377	242	0.66	0.069	3.5	0.157	4.8	0.020	2.1	127.6 ±3.0	-80	±320	107.7	±9.3
T11-1-10	464	210	0.47	0.068	6.1	0.135	8.8	0.020	2.1	126.2 ±3.0	-393	±660	103	±21
T11-1-11	277	152	0.57	0.076	8.0	0.133	13	0.020	2.1	126.6 ±3.3	-970	±1500	95	±29
T11-1-12	600	385	0.66	0.061	5.3	0.137	6.7	0.019	2.1	123.3 ±2.9	-494	±530	102	±11
T10-1-1	96	91	0.98	0.159	12			0.020	2.5	125.9 ±4.7			67	±44
T10-1-2	117	72	0.63	0.127	9.2	0.155	22	0.020	2.4	123.4 ±3.6	-1,140	±2500	79	±35
T10-1-3	561	330	0.61	0.066	4.8	0.125	7.0	0.019	1.9	119.5 ±2.3	457	±180	131.6	±6.7
T10-1-4	133	84	0.66	0.119	11	0.162	24	0.020	2.4	124.8 ±3.7	-4	±1600	103	±45
T10-1-5	113	85	0.78	0.131	12	0.126	38	0.019	2.3	123.4 ±4.0	768	±900	144	±33
T10-1-6	147	94	0.66	0.099	10	0.112	27	0.020	2.2	127.7 ±3.3	-1,520	±2600	103	±29
T10-1-7	170	136	0.82	0.089	2.9	0.104	7.7	0.019	2.9	121.9 ±3.6	-820	±1200	112	±18
T10-1-8	157	108	0.71	0.095	5.6	0.130	12	0.019	2.1	121.3 ±2.7	79	±660	117	±19
T10-1-9	499	271	0.56	0.070	4.2	0.139	5.8	0.019	1.9	118.4 ±2.3	329	±200	116.8	±8.8
T10-1-10	82	56	0.71	0.144	10.0	0.109	40	0.019	3.1	124.0 ±4.6	-560	±2200	113	±39
T10-1-11	108	81	0.77	0.131	7.3	0.134	22	0.020	2.4	124.5 ±3.4	538	±750	133	±26
T10-1-12	160	133	0.86	0.119	9.9	0.124	28	0.019	2.2	122.9 ±3.3	440	±730	131	±19

物,该年龄与前人对凤凰山黑云母正长花岗岩 TIMS 法测得的 (130±2)Ma(Wu et al., 2005)、K-Ar 法测得的 130 Ma(陈树良, 2003)在误差范围内基本一致。可见凤凰山正长花岗岩可能为燕山晚期岩浆活动产物。

## 4.2 岩石地球化学特征

### 4.2.1 主量元素特征

辽东凤凰山黑云母正长花岗岩地球化学研究结果(表2)表明,黑云母正长花岗岩样品表现为高硅、高钾、贫 Mg、贫 Ca 和过铝质的特征,其中 SiO<sub>2</sub> 含量为 65.65%~73.62%, K<sub>2</sub>O 为 3.52%~5.76%, Na<sub>2</sub>O 为 3.64%~4.26%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 13.4%~15.49%, A/CNK 值

1.02~1.46, 平均 1.13, 属铝过饱和岩石。在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解上投在钾玄岩系列(图 4a), 在 QAP 图解上岩石大部分落入正长花岗岩区域, 只有 1 个点落入碱长花岗岩区域(图 4b)。在 A/CNK-A/NK 铝饱和指数图解上, 样品点均落在过铝质区域内(图 4c)。

### 4.2.2 微量元素特征

微量元素的分析结果(表 3)显示, 凤凰山黑云母正长花岗岩稀土元素总量(ΣREE)为 133.00×10<sup>-6</sup>~247.58×10<sup>-6</sup>, 平均 192.69×10<sup>-6</sup>, (La/Yb)<sub>N</sub> 为 5.83~16.29, LREE/HREE 为 10.38~14.10, 平均 12.28, δEu 为 0.19~0.54, 平均 0.35, 显示亏损, 稀土元素总量变化大, 在 REE 球粒陨石标准化配分图中(图 5a), 表

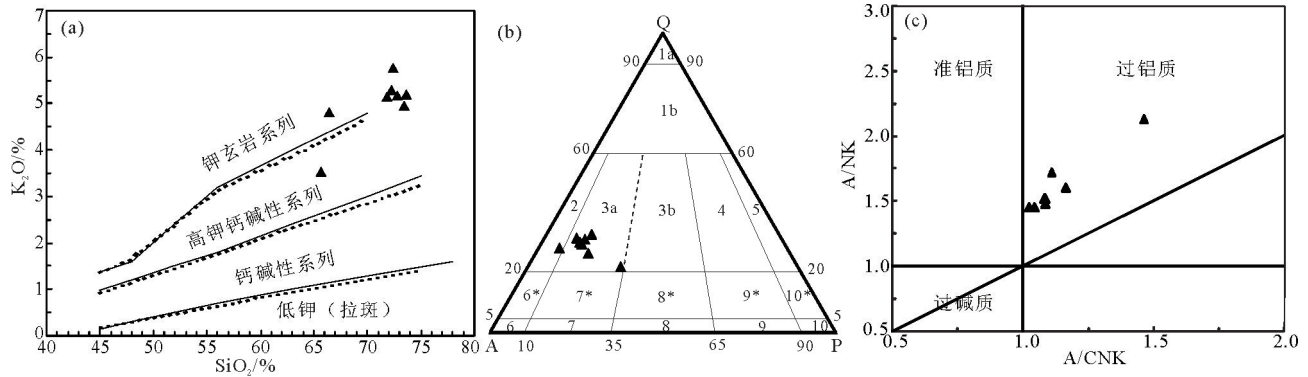


图4 辽宁丹东凤凰山岩体花岗岩的K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> (a,据 Rollinson, 1993)、QAP图解(b,据 Le Maitre et al.,1989)及 A/CNK-A/NK 图解(c,据 Maniar and Piccoli,1989)

1a—石英岩(石英岩);1b—富石英花岗岩类;2—碱长花岗岩;3a—花岗岩(正长花岗岩);3b—花岗岩(二长花岗岩);4—花岗闪长岩;5—英云闪长岩;6\*—石英碱长正长岩;6—碱长正长岩;7\*—石英正长岩;7—正长岩;8\*—石英二长岩;8—二长岩;9\*—石英二长闪长岩、石英二长辉长岩;9—二长闪长岩、二长辉长岩;10\*—石英闪长岩、石英辉长岩、石英斜长岩;10—闪长岩、辉长岩、斜长岩

Fig. 4 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> diagram, (a, after Rollinson, 1993), QAP diagram (b, after Le Maitre et al.,1989) and A/CNK-A/NK diagram (c, after Maniar and Piccoli,1989) of granite sampled from Fenghuangshan pluton in Dandong, Liaoning Province

1a-Quartzolite;1b-Quartz-rich-granitoids; 2-Alkali-feldspar-granite; 3a-Syenogranite; 3b-Monzogranite; 4-Granodiorite; 5-Tonalite; 6\*- Quartz-alkali-feldspar-syenite; 6-Alkali-feldspar-syenite; 7\*-Quartz-syenite; 7- Syenite; 8\*-Quartz-monzonite; 8-Monzonite; 9\*-Quartz-monzodiorite;quartz-monzogabbro; 9-Monzodiorite; monzogabbro; 10\*-Quartz-diorite; quartz-gabbro;and quartz-anorthosite; 10-Diorite, gabbro, and anorthosite

现为右倾型, (La/Yb)<sub>N</sub> 为 5.83 ~ 16.29, 一致性较好, 但又略有差异, 以上均说明轻稀土富集、分馏强, 重稀土亏损、分馏弱。在 Eu 处出现明显的低谷, 显示 Eu 负异常, 反映了斜长石结晶分离程度增强。

表2 辽东凤凰山黑云母正长花岗岩主量元素含量(%)  
Table 2 Major elements (%) data of the Fenghuangshan pluton in Liaodong area

样品号	S1011	S1012	S1013	S1014	S1111	S1112	S1113	S1114
SiO <sub>2</sub>	72.38	73.42	72.77	72.24	71.81	66.41	65.65	73.62
TiO <sub>2</sub>	0.16	0.14	0.17	0.18	0.24	0.64	0.64	0.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.17	13.68	13.9	13.81	14.06	15.49	15.22	13.40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.20	1.95	2.32	2.46	3.05	4.68	6.31	2.40
MnO	0.06	0.06	0.08	0.09	0.08	0.09	0.03	0.07
MgO	0.15	0.28	0.21	0.33	0.37	0.99	1.83	0.22
CaO	0.28	0.32	0.34	0.42	0.28	0.99	0.33	0.30
Na <sub>2</sub> O	3.84	4.08	4.01	4.26	3.64	4.23	3.64	4.05
K <sub>2</sub> O	5.76	4.94	5.16	5.28	5.14	4.80	3.52	5.19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.03	0.04	0.04	0.02	0.19	0.13	0.01
FeO	0.66	0.86	0.79	1.27	1.40	2.25	2.91	1.40
LOI	0.75	0.83	0.77	0.66	1.07	1.25	2.49	0.41
A/CNK	1.09	1.08	1.09	1.02	1.17	1.11	1.46	1.05
σ43	3.13	2.67	2.82	3.12	2.68	3.50	2.26	2.79
Q	26.81	29.18	28.14	25.10	28.84	18.86	25.44	28.23
An	1.20	1.42	1.46	1.82	1.23	3.66	0.83	1.39
Ab	32.65	34.64	34.02	35.91	30.84	35.57	30.80	33.98
Or	34.15	29.30	30.59	31.13	30.35	28.22	20.83	30.43

原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图 5b)显示, 凤凰山黑云母正长花岗岩相对富集大离子亲石元素 Rb 和 Th, Zr 和 Hf 元素显示明显正异常, Sr、P、Ba、Ti、Nb 显示负异常特征, 与典型的 A 型花岗岩微量元素分配形式比较接近。凤凰山正长花岗岩的 Rb/Nb 比值为 6.02 ~ 8.64, 明显高于大陆地壳的 Rb/Nb 比值 2.2 ~ 4.7, 说明陆壳物质对岩体成岩影响较大, 从而导致 Rb 的含量增加 (Sylvester, 1989)。Rb 丰度值为 109.77×10<sup>-6</sup> ~ 194.11×10<sup>-6</sup>, 明显低于高分异成因的花岗岩 Rb 丰度值 (270×10<sup>-6</sup>; Pearce et al., 1984; 王强等, 2000), 暗示凤凰山黑云母正长花岗岩岩浆主要来源于地壳的部分熔融。

## 5 讨论

### 5.1 成岩时代

在辽宁东部地区早白垩世 A 型花岗岩以四平街、千山、凤凰山等岩体为代表, 其岩性主要为角闪石花岗岩、二长花岗岩、黑云母正长花岗岩, 伴生少量的正长岩, 在千山 A 型花岗岩中常见细粒镁铁质包体(孙金凤和杨进辉, 2009)。详细的锆石 U-Pb 年代学测定结果表明, 四平街岩体形成于 (130±1)Ma (TIMS 法)(Wu et al., 2005), 千山岩体形成于 (126±2)Ma(LA-ICP-MS 法)(Wu et al., 2005)。

表3 辽东凤凰山黑云母正长花岗岩微量元素含量( $10^{-6}$ )  
Table 3 Trace and rare-earth elements( $10^{-6}$ ) data for the Fenghuangshan pluton

样品号	S1011	S1012	S1013	S1014	S1111	S1112	S1113	S1114
Cr	6.36	6.19	18.33	14.43	8.67	11.51	46.22	7.63
Ni	1.51	2.71	3.30	3.80	3.00	2.96	14.08	2.02
Rb	194.11	160.92	154.19	152.68	193.18	156.18	109.77	175.55
Sr	55.37	62.54	100.28	81.34	76.44	223.95	143.62	47.27
Zr	178.66	158.51	188.85	191.49	208.48	263.25	253.07	182.53
Nb	27.58	24.86	24.48	25.38	22.43	18.08	14.05	21.46
Ba	257.32	376.25	343.46	361.54	367.30	804.51	679.70	276.30
Hf	6.62	6.88	5.36	7.80	7.68	7.67	7.59	6.82
Ta	2.03	0.62	1.30	2.17	1.61	1.39	0.91	1.83
Th	19.70	34.96	24.97	31.50	40.78	33.58	27.75	37.06
U	3.69	3.46	3.18	3.21	4.13	4.13	0.55	4.78
Li	5.48	6.50	4.65	4.37	11.61	14.92	18.52	4.28
Be	2.74	2.51	2.89	3.28	2.29	2.33	1.95	3.35
Co	2.25	1.63	2.95	2.80	3.57	4.94	7.76	1.57
V	4.76	2.86	10.48	6.47	10.30	38.83	66.26	4.36
Y	18.43	19.79	13.81	19.81	23.20	25.10	23.26	28.36
La	21.89	17.91	19.32	42.21	40.73	57.73	49.72	44.40
Ce	99.69	79.96	83.78	108.43	109.46	106.63	107.51	94.23
Pr	4.68	4.36	4.38	8.83	9.28	12.14	12.06	9.57
Nd	15.01	15.52	14.94	29.56	32.53	44.40	44.83	33.84
Sm	2.78	3.28	2.89	4.95	6.12	7.41	7.22	5.87
Eu	0.26	0.36	0.35	0.41	0.53	1.20	0.96	0.34
Gd	2.59	2.53	2.51	4.30	4.84	5.84	6.02	4.97
Tb	0.38	0.42	0.36	0.57	0.70	0.83	0.83	0.74
Dy	3.02	3.42	2.43	3.46	4.58	4.78	4.74	5.17
Ho	0.67	0.73	0.55	0.73	0.95	1.02	0.99	1.15
Er	1.44	1.58	1.19	1.76	2.15	2.31	2.36	2.31
Tm	0.37	0.36	0.28	0.37	0.47	0.41	0.43	0.46
Yb	2.12	2.20	1.68	2.27	2.77	2.54	2.70	2.92
Lu	0.32	0.35	0.24	0.32	0.40	0.35	0.38	0.42
ΣREE	155.23	133.00	134.91	208.18	215.50	247.58	240.75	206.39
LREE	144.32	121.40	125.66	194.39	198.64	229.51	222.29	188.25
HREE	10.91	11.59	9.25	13.79	16.86	18.07	18.46	18.14
LREE/HREE	13.23	10.47	13.58	14.10	11.78	12.70	12.04	10.38
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	7.40	5.83	8.23	13.35	10.54	16.29	13.19	10.93
δEu	0.29	0.37	0.39	0.27	0.29	0.54	0.43	0.19

前人资料显示辽东凤凰山由黑云母正长花岗岩组成, TIMS法测得的( $130 \pm 2$ )Ma(Wu et al., 2005), K-Ar法测得黑云母正长花岗岩的年龄为130 Ma(陈树良, 2003)。本文给出精确的花岗岩 SHRIMP U-Pb测年结果: 黑云母正长花岗岩加权年龄为( $122 \pm 2$ )Ma ~ ( $125.0 \pm 1.7$ )Ma, 形成于早白垩世, 为燕山晚期岩浆活动的产物。

## 5.2 岩石类型及岩石成因

铝质“A”型花岗岩在辽东地区广泛发育, Yang et al. (2006)曾对该地区典型的“A”型花岗岩体——千山岩体作过详细的研究, 但针对辽东凤凰山正长花岗岩却鲜有讨论。8个黑云母正长花岗岩样品的  $SiO_2=65.65\% \sim 73.62\%$ ,  $K_2O=3.52\% \sim 5.76\%$ ,  $Na_2O=3.64\% \sim 4.26\%$ ,  $Al_2O_3=13.4\% \sim 15.49\%$ ,  $MgO=0.15\% \sim 1.83\%$ ,  $CaO=0.28\% \sim 0.99\%$ ,  $Na_2O+K_2O=7.16\% \sim 9.60\%$ ,  $K_2O/Na_2O=0.97 \sim 1.50$ , 地球化学特征显示凤凰山黑云母正长花岗岩具有富硅、碱、钾, 贫钙、低镁的特点, 并且具有明显的Eu负异常(图5a), 微量元素显示其相对富集大离子亲石元素Rb和Th, Zr和Hf显示明显正异常特征, Sr、P、Ba、Ti、Nb元素显示明显负异常特征(图5b), 以上特征均符合A型花岗岩地球化学特征(Whalen et al., 1987; 王强等, 2000), 碱度率AR在2.71~5.13, 基本在铝质A型花岗岩AR值范围内,  $FeO/MgO$  ( $FeO_t=FeO+0.8998Fe_2O_3$ ) 比值为4.69~18.05, 明显高于全球典型的I型(991个样品平均值2.27)、S型(578个样品平均值2.38)和M型(17个样品平均值2.37)花岗岩的 $FeO/MgO$ 值(Whalen et al., 1987), 而与澳大利亚Lachlan褶皱带中的铝质A型花岗岩的 $FeO/MgO$ 变化范围(4.16~35.2)相近(King et al., 1997)。在Collins et al. (1982)的 $K_2O-Na_2O$ 花岗岩成因类型判别图上, 几乎所有样品点均落入A型花岗岩区域中(图6a), 在微量元素A型花岗岩( $Na_2O+K_2O$ )/ $CaO-(Zr+Nb+Ce+Y)$ 判别图解上绝大多数样品点落在A型花岗岩区域, 以上地球化学特征及判别图解(图6a, 图b, 图4c)皆显示, 凤凰山黑云母正长花岗岩属于过铝质A型花岗岩。

从表3数据及图5b可知, 凤凰山花岗岩的Rb/Nb比值为6.02~8.64, 明显高于大陆地壳的Rb/Nb比值2.2~4.7, 说明地壳物质对花岗岩岩体成岩影响较大, 从而导致Rb的含量增加(Sylvester, 1989)。Nb/Ta比11.71~18.77, 均值14.03, 低于原始地幔的Nb/Ta比 $17.5 \pm 2.0$ (Green, 1995), 且Nb出现低谷, 说明源区受地壳组分的影响较大。结合前人在该区已做的研究, Yang et al. (2006)认为该区另一个典型的A型花岗岩体千山花岗岩源区具有多元性, 来源于上地壳和富集岩石圈地幔的长英质岩浆和镁铁质岩浆混合、分离结晶作用形成的, 根据本次研究



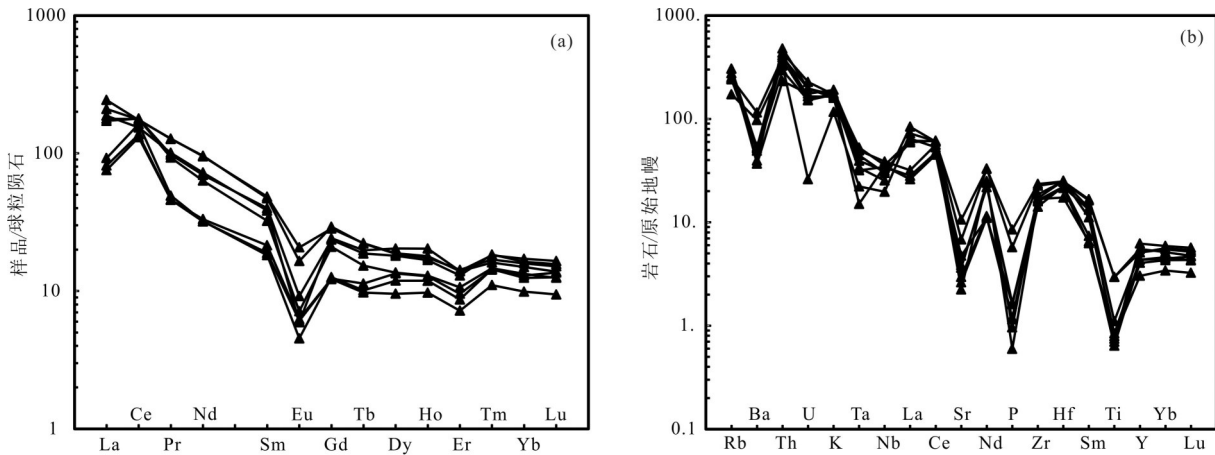


图5 辽宁丹东凤凰山正长花岗岩的稀土配分曲线(a)和微量元素蛛网图(b)(标准值据 Sun and Mcdonough,1989)

Fig.5 Rare earth element distribution curves (a) and trace element spider diagram (b) of granite sampled from Fenghuangshan pluton in Dandong, Liaoning Province (the normal value is from Sun and Mcdonough,1989)

的凤凰山黑云母正长花岗岩与千山A型花岗岩地球化学特征相似,均具有A型花岗岩特征,凤凰山黑云母正长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄( $122 \pm 2$ ) Ma ~ ( $125.0 \pm 1.7$ )Ma, 千山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄( $126 \pm 2$ )Ma (Wu et al., 2005), 推测二者是同源岩浆同期演化的产物,并且与近年来研究发现的华北克拉通东部早白垩世 A 型花岗岩的形成时代(130 ~ 110 Ma)基本相同,推测它们可能形成于同一构造背景下。

### 5.3 地质意义

以往的研究表明,A型花岗岩均产于拉张的构造背景下(王德滋,1995),其中一类花岗岩形成于陆内裂谷和地幔热柱环境,另一类形成于碰撞后的构造环境(Eby, 1992)。由 Nb-Y-Ce 判别图解可以看出,凤凰山黑云母正长花岗岩数据大部分落入 A1 和 A2 分界线处(图 6c),偏向 A1 型花岗岩区域中(8 个采样点中 5 个落入 A1, 3 个落入 A2 区域),结合凤凰山花岗岩所处的构造地质环境进行综合分析,笔者认为凤凰山黑云母正长花岗岩可能属于过铝质 A 型花岗岩的 A1 和 A2 过渡类型,充分反映了辽宁东部早白垩世的地质构造与岩浆活动的地球动力学背景。

凤凰山正长花岗岩的形成可能与中生代欧亚大陆与古太平洋板块构造环境密切相关。侏罗世中晚期至早白垩世早期,全球板块运动体制调整,

东亚构造环境发生重大变革,中国大陆进入了强烈的陆内造山与燕山变形期(董树文,2007;尚鲁宁等,2020),大约在 185 Ma 前,太平洋板块开始形成、发展。从中侏罗世(160 Ma)开始,太平洋板块不断向北扩张,同时伴随库拉板块向北( $NE2^\circ \sim NW13^\circ$ )运动,并斜向俯冲于欧亚板块之下(Maruyama and Seno,1986),由于俯冲的阻力比较大,如果有走滑的力,相对于俯冲要省力,所以就会先往走滑的方向运动,此时,俯冲板片和大洋板块由于位于不同的高度水平,重力的不稳定性而发生拆沉作用。因此,在不超过几十千米的深度处,由于拆沉作用导致岩石圈地幔和下地壳沉入软流圈,为上升的地幔物质提供通道。地幔岩浆与地壳熔融的岩浆相混合,从而形成了早白垩世壳幔混合型花岗岩。早白垩世,中国东部包括辽东半岛发育着大规模伸展型花岗质岩浆活动,在郯庐断裂两侧的胶东、辽宁东部、鲁西、辽西、燕山等地区尤其发育,岩体形成时代集中于 130 ~ 110 Ma,属壳幔混合型花岗岩(I-A 型)(张田和张岳桥,2007)。由本次精确的锆石 SHRIMP-U-Pb 年代学数据可知,凤凰山黑云母正长花岗岩形成时代为 122 ~ 125 Ma,时间上与早白垩世辽东地区的构造-岩浆演化基本一致。笔者根据对 A 型花岗岩的综合研究,结合凤凰山黑云母正长花岗岩形成时间、空间(图 1)分析,认为辽东凤凰山早白垩世 A 型花岗岩应为自中侏罗世开始由板块俯冲引起的东亚大陆边缘构造过程

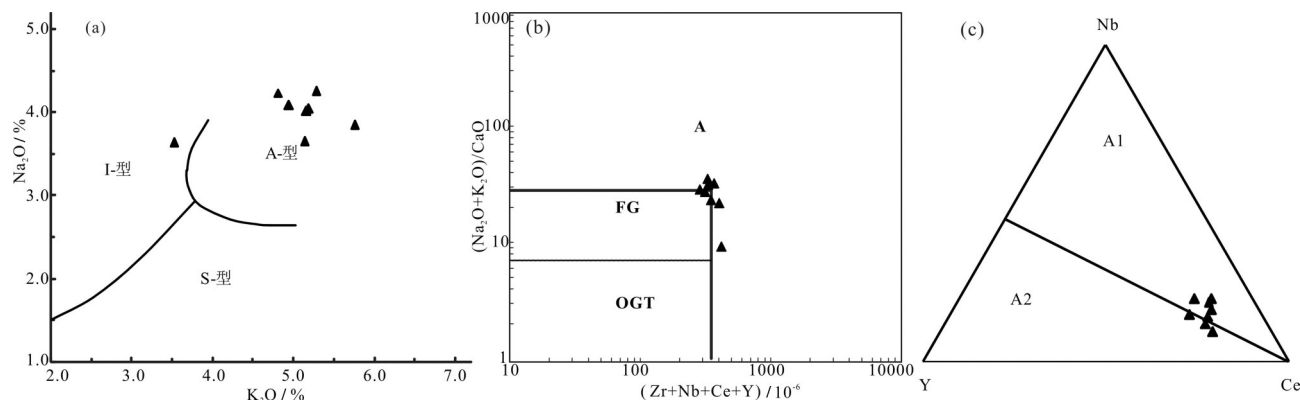


图6 辽宁丹东凤凰山岩体花岗岩的 $K_2O-SiO_2$ 判别图解(a, 底图据 Collins et al., 1982)、 $(Na_2O+K_2O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y)$ 相关图(b, 据 Whalen et al., 1987)及 Nb-Y-Ce 构造环境判别图(c, 据 Eby, 1992)

A1—A1型花岗岩; A2—A2型花岗岩; FG—(M+I+S)型分异花岗岩; OTG—未分异(M+I+S)型花岗岩

Fig. 6  $K_2O-SiO_2$  diagram (a, after Collins et al., 1982),  $(Na_2O+K_2O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y)$  diagram (b, after Whalen et al., 1987) and Nb-Y-Ce diagram (c, after Eby, 1992) of granite sampled from Fenghuangshan pluton in Dandong, Liaoning Province  
A1—A1 type granite; A2—A2 type granite; FG—(M+I+S) type differentiated granite; OTG—Undifferentiated (M+I+S) type granite

的响应。

## 6 结 论

(1)根据岩体测年和花岗岩岩石地球化学特征,辽东风凰山黑云母正长花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄分别为  $(122.3 \pm 1.7) Ma$ 、 $(125.0 \pm 1.7) Ma$ 、 $(122 \pm 2) Ma$ ,代表了岩浆结晶年龄,凤凰山正长花岗岩侵入时代属于早白垩世。

(2)凤凰山黑云母正长花岗岩的 A/CNK 值  $1.02 \sim 1.46$ , 碱度率 AR 在  $2.71 \sim 5.13$ ,  $FeO/MgO$  比值为  $4.69 \sim 18.05$ , 表现为过铝质 A 型花岗岩的 A1 和 A2 过渡类型。微量元素相对富集大离子亲石元素 Rb、Th, Zr、Hf 具明显正异常, Sr、P、Ba、Ti、Nb 具明显负异常特征。稀土总量较高,轻重稀土之间的分馏不明显。

(3)综合区域地球动力学研究,认为凤凰山正长花岗岩产生于陆内剪切相关的伸展环境,应为自中侏罗世开始由板块俯冲引起的东亚大陆边缘构造过程的响应。

## Reference

Barbarin B. 1990. Granitoids main petrogenetic classification in relation to origin and tectonic setting[J]. *Geochemical Journal*, 25: 227-238.  
Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*,

46: 605-626.

- Bonin B, Azzouni S A, Bussy F, Ferrag S. 1998. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: Petrologic constraints and geodynamic settings[J]. *Lithos*, 45(1/4): 45-70.  
Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143: 602-622.  
Chen Shuliang. 2003. Finding report 1: 25000 Regional Geological Survey of Dandong and Donggang City[R]. Dalian Branch of Liaoning Institute of Geology and Mineral Resources, 51-60 (in Chinese).  
Claoue-Long J C, Compston W, Roberts J, Fanning C M. 1995. Two Carboniferous ages: A comparison of SHRIMP zircon dating with conventional zircon ages and  $^{40}Ar/^{39}Ar$  analysis[J]. *SEPN Special Publication*, 5: 3-31.  
Collins W J, Beams S D, White A J, Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granite with particular reference to South eastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189-200.  
Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxing, Yang Zhenyu, Qi Qiang, Wang Tao, Hu Jianmin, Chen Xuanhua. 2007. The Jurassic tectonic reform and the new interpretation of Yanshan Movement in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1449-1461 (in Chinese with English abstract).  
Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 26: 115-134.  
Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20(7): 641-644.  
Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical

- rocesse in the crust mantle system[J]. *Chemical Geology*, 120: 347–359.
- King P L, White A J R, Chappell B W, Allen C M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, Southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38: 371–391.
- Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A. 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms[J]. Blackwell, Oxford, 11: 25–37.
- Lin Jingqian, Tan Dongjuan, Chi Xiaoguo. 1992. Mesozoic Granites in Jiaodong and Liaotung Peninsulas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–208(in Chinese).
- Maniar P D, Piccolli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101 (5): 635–643.
- Maruyama S, Seno T. 1986. Orogeng and relative plate Motions: Example of the Japanese Islands[J]. *Tectonophysics*, 127: 305–329.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983.
- Rollinson H. 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation[J]. Longman Scientific and Technical, London, 52–61.
- Shang Luning, Zhang Yong, Yao Yongjian, Wu Hao, Hu Gang, Tian Zhixian. 2020. Late Cenozoic evolution of East China continental margin and restoration of plate interaction processes[J]. *Geology in China*, 47(5): 1323–1336(in Chinese with English abstract).
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, Jian Ping. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geological Review*, 48 (Supp.): 26–31(in Chinese with English abstract).
- Song Yunhong, Hao Libo, Yang Fengchao, Zhao Dongfang. 2015. Zircon SHRIMP U–Pb age, geochemical characteristics and geological significance of the Triassic Dixiongshan granites in Liaodong Peninsula[J]. *Geology and Resources*, 24(5): 444–449(in Chinese with English abstract).
- Song Yunhong, Yang Fengchao, Yan Guolei, Wei Minghui, Shi Shaoshan. 2016. SHRIMP U–Pb ages and Hf isotopic compositions of Paleoproterozoic granites from the eastern part of Liaoning Province and their tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2620–2636(in Chinese with English abstract).
- Sun Jinfeng, Yang Jinhui. 2009. Early Cretaceous A-type granite and craton destruction in eastern North China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 137–147(in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J(eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society. London, Special Publications, 42(1): 312–345.
- Sylvester P J. 1989. Post-collisional alkaline granites[J]. *Journal of Geology*, 97: 261–280.
- Wang Dezi, Zhao Guangtao and Qiu Jiansheng. 1995. The tectonic constraint on the Late Mesozoic A-type granites in eastern China[J]. *Geological Journal of Universities*, 1(2): 13–22(in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin. 2000. Determination of late Yanshanian A-type granite in Tongbai–Dabie orogenic belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 297–306(in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407–419.
- Williams I S. 1998. U–Th–Pb geochronology by ion microprobe[C]//Mckibben M A, Shanks III W C, Ridley W I(eds.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*[J]. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1–35.
- Williams I S, Buick C I, Cartwright I. 1996. An extended episode of Early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynolds Range, Central Australia[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 14: 29–47.
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O, Yang J H. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233: 103–119.
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 187: 143–173.
- Yang Fengchao, Song Yunhong, Yang Jialin, Gu Yuchao, Xu Jia, Yang Hongzhi. 2020. The first reported of zircon SHRIMP U–Pb age of amphibolite in Liaodong on the eastern of North China Craton[J]. *Geology in China*, 47(3): 892–893(in Chinese).
- Yang Fengchao, Sun Jinggui, Song Yunhong, Zhang Peng, Bi Zhongwei. 2016. SHRIMP U–Pb age, Hf isotope composition and geochemical characteristics of Neoproterozoic granitic complex in Liaodong Lianshanguan Area, NE China[J]. *Earth Science*, 41 (12): 2008–2018(in Chinese with English abstract).
- Yang Fengchao, Song Yunhong, Yang Jialin, Shen Xin, Gu Yuchao. 2018. SHRIMP U–Pb age and geochemical characteristics of granites in Wulong–Sidaogou gold deposit, East Liaoning[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(5): 135–142(in Chinese with English abstract).
- Yang Fengchao, Song Yunhong, Hao Libo, Chai Peng. 2015. Late Jurassic SHRIMP U–Pb age and Hf isotopic characteristics of granite from the Sanjiazi Area in Liaodong and their geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(10): 1773–1782(in Chinese with English abstract).

- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Wilde S A, Chu M F. 2006. A hybrid origin for the Qianshan A- type granites, Northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 89(1/2): 89-106.
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Belousova E, Griffin W L. 2008. Mesozoic decratonization of the North China block[J]. *Geology*, 36(6): 467-470.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Zhong Lin, Zhu Meifei, Simon A W. 2004. The magmas mixing petrogenesis of A- type granites :Qianshan pluton granites in Dandong, Liaoning, the geochemistry of its Inclusions and the isotopic evidence for Sr- Nd- Hf[C]//National Workshop on Petrology and Geochemistry, 319- 320(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhongjie. 2021. Zircon U- Pb ages and petrogeochemical characteristics of Paleoproterozoic granitic pegmatites in Xiuyan area, eastern Liaoning Province, and their geological significance[J]. *Geological Review*, 67(2): 523- 541(in Chinese with English abstract).
- Zhang Tian, Zhang Yueqiao. 2007. Mesozoic intrusive magmatism sequence and its structural constraints in the Jiaodong Peninsula[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 323- 336(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yan, Li Shenghui, Yang Zhongzhu, Zhang Peng, Chen Jingsheng, Zhang Jing, Chen Cong. 2022. Zircon U- Pb dating of monzogranite dikes in Wengquangou Biron orefield, Eastern Liaoning: Constraints on metallogenic age[J]. *Geology and Resources*, 31(3): 342-350(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宁, 季强, 王涛, 胡建民, 陈宝华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. *地质学报*, 81(11): 1449-1461.
- 陈树良. 2003. 1:25万区域地质调查报告: K51C004003(丹东)、J51C001003(东港市)[R]. 辽宁省地质矿产调查院大连分院, 51-60.
- 林景仟, 谭东娟, 迟效国. 1992. 胶辽半岛中生代花岗岩[M]. 北京: 地质出版社, 1-208.
- 尚鲁宁, 张勇, 姚永坚, 吴浩, 胡刚, 田陟贤. 2020. 中国东部大陆边缘晚新生代构造演化及板块相互作用过程重建[J]. *中国地质*, 47(5): 1323-1336.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. *地质论评*, 48(增刊): 26-31.
- 宋运红, 杨凤超, 闫国磊, 魏明辉, 石绍山. 2016. 辽东地区古元古代花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及构造意义[J]. *地质学报*, 90(10): 2620-2636.
- 宋运红, 郝立波, 杨凤超, 赵东芳. 2015. 辽东三叠纪弟兄山岩体 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. *地质与资源*, 24(5): 444-449.
- 孙金凤, 杨进辉. 2009. 华北东部早白垩世 A 型花岗岩与克拉通破坏[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(1): 137-147.
- 王德滋, 赵广涛, 邱检生. 1995. 中国东部晚中生代 A 型花岗岩的构造制约[J]. *高校地质学报*, 1(2): 13-22.
- 王强, 赵振华, 熊小林. 2000. 桐柏—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.
- 杨仲杰. 2021. 辽东岫岩地区古元古代花岗岩伟晶岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. *地质论评*, 67(2): 523-541.
- 杨凤超, 宋运红, 杨佳林, 顾玉超, 胥嘉, 杨宏志. 2020. 华北克拉通东部辽东地区斜长角闪岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄报道[J]. *中国地质*, 47(3): 892-893.
- 杨凤超, 孙景贵, 宋运红, 张朋, 毕中伟. 2016. 辽东连山关地区新太古代花岗岩杂岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及地质意义[J]. *地球科学*; 41(12): 2008-2018.
- 杨凤超, 宋运红, 杨佳林, 沈鑫, 顾玉超. 2018. 辽东五龙、四道沟金矿集区花岗岩杂岩 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 42(5): 135-142.
- 杨凤超, 宋运红, 郝立波, 柴鹏. 2015. 辽东三家子地区晚侏罗世花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义[J]. *地质学报*, 89(10): 1773-1782.
- 杨进辉, 吴福元, 鍾霖, 朱美妃, Simon A W. 2004. A 型花岗岩的岩浆混合成因: 辽东千山花岗岩及包体的地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素证据[C]//2004年全国岩石学与地球化学研讨会, 319-320.
- 张田, 张岳桥. 2007. 胶东半岛中生代侵入岩浆活动序列及其构造制约[J]. *高校地质学报*, 13(2): 323-336.
- 赵岩, 李生辉, 杨中柱, 张朋, 陈景胜, 张璟, 陈聪. 2022. 辽东翁泉沟硼矿区二长花岗岩脉锆石 U-Pb 年龄及对成矿时代的制约[J]. *地质与资源*, 31(3): 342-350.