

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.201>



辽东半岛早白垩世黑云母二长闪长岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义

寇林林¹, 张朋^{1*}, 赵岩¹, 姚晓峰², 沙德铭¹, 杨中柱¹

1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁沈阳 110034

2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

摘要: 为探讨辽东半岛中生代闪长岩类岩石成因及其形成构造背景, 选取辽东半岛岫岩西南部黄岭岩体为研究对象, 开展岩相学、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学、Hf 同位素地球化学和岩石地球化学研究。结果表明: 黄岭岩体由黑云母二长闪长岩组成; 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 127.4 ± 1.9 Ma, 成岩为早白垩世; 岩石地球化学元素特征表明, 黄岭黑云母二长闪长岩具高钾钙碱性, 轻稀土元素富集, 重稀土亏损, 富集 Rb、Zr、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、P、Ti 等高场强元素, 正 Eu 异常; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-20.1 \sim -18.0$, 二阶段 Hf 模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 为 $2\,316 \sim 2\,450$ Ma, 揭示二长闪长岩可能是古元古代古老地壳部分熔融形成。结合区域构造演化推测黄岭岩体形成于古太平洋板块向欧亚板块俯冲挤压后折返伸展的构造背景。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; 稀土元素; 地球化学; 黄岭岩体; 辽东半岛。

中图分类号: P59

文章编号: 1000-2383(2020)11-3950-12

收稿日期: 2020-07-10

Zircon U-Pb Age, Hf Isotope and Geological Significance of Early Cretaceous Monzodiorite in Liaodong Peninsula

Kou Linlin¹, Zhang Peng^{1*}, Zhao Yan¹, Yao Xiaofeng², Sha Deming¹, Yang Zhongzhu¹

1. Shenyang Geological Survey Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, China

2. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

Abstract: In order to determine the petrogenesis and tectonic setting of the Early Cretaceous biotite monzodiorite in Liaodong Peninsula, the lithology identification, zircon LA-ICP-MS U-Pb dating, major and trace elements, and Hf isotope data for the Huangling rock mass from southwest of Xiuyan are presented in this paper. The LA-ICP-MS U-Pb ages of the Huangling pluton of the monzodiorite is 127.4 ± 1.9 Ma. The results of elemental and isotope geochemistry show that the Huangling monzodiorite belongs to high-K calc-alkaline series, and enriched in LREE and LILE (Rb, Zr, K), but depleted in HREE and HFSE (Nb, P, Ti) with positive Eu anomalies. The zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of the pluton range from -20.1 to -18.0 , $T_{\text{DM}2}$ ranges between $2\,450$ and $2\,316$ Ma, suggesting that the monzodiorite was mainly derived from the partial melting of the Paleoproterozoic crustal material. Combined with regional tectonic evolution, it is proposed that the Huangling monzodiorite diagenetic tectonic environment is the active continental margin, maybe formed in the extension tectonic environment, which is closely associated with the subduction of

基金项目: 国家重点研发计划项目 (Nos. 2018YFC0603804, 2016YFC0600108); 国家自然科学基金项目 (No. 41502093); 中国地质调查局地质调查项目 (Nos. DD20190165, DD20190042-3, DD20160049)。

作者简介: 寇林林 (1983—), 女, 高级工程师, 硕士, 从事矿产地质调查及综合研究工作, 主要从事辽东地区成矿系统三维结构与成矿预测研究。ORCID: 0000-0002-2984-7112. E-mail: koulinlin@126.com

***通讯作者:** 张朋, E-mail: geozhangpeng2010@163.com

引用格式: 寇林林, 张朋, 赵岩, 等, 2020. 辽东半岛早白垩世黑云母二长闪长岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义. 地球科学, 45(11): 3950—3961.

the Paleo-Pacific plate.

Key words: zircon U-Pb; rare earth elements; geochemistry; Huangling pluton; Liaodong Peninsula.

0 引言

辽东半岛位于华北克拉通北缘东部,是华北克拉通晚中生代岩石圈减薄最为强烈和典型的地区之一(Zhu *et al.*, 2012),区内发育大面积中生代花岗岩,前人详细的锆石 U-Pb 年代学研究表明,辽东半岛中生代花岗质岩浆作用可分为 3 期,分别为晚三叠世(233 ~ 212 Ma)、侏罗纪(190 ~ 156 Ma)和早白垩世(131 ~ 117 Ma)(吴福元等, 2005; 张朋等, 2015, 2016, 2019; 刘永俊等, 2020),其中以早白垩世岩浆活动最为强烈. 辽东半岛晚三叠世岩浆活动与华北克拉通和扬子克拉通碰撞有关;早侏罗世花岗质岩石形成与欧亚大陆下的古太平洋板块俯冲有关;早白垩世岩浆活动与造山后岩石圈减薄的伸展环境有关(张朋等, 2019).

前人对辽东半岛中生代岩浆活动和形成构造背景的研究主要是基于对花岗质岩石的研究,而对中性岩的研究则很少涉及. 鉴于此,本文以辽东半岛丹东地区黄岭岩体(二长闪长岩)为研究对象,通过锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年、元素地球化学和锆石原位 Hf 同位素研究,为辽东半岛

中生代构造岩浆活动提供新依据.

1 地质背景

辽东半岛位于华北克拉通北缘东段,太古代 TTG 岩系构成其基底,其上覆盖有古元古代辽河岩群变质岩系、新元古代—震旦纪沉积岩系(图 1). 太古代 TTG 岩系主要分布于辽东半岛鞍山、金州和亮甲店一带(3.85 ~ 3.20 Ga; Yang *et al.*, 2007). 岩石组合类型主要为强变形英云闪长质片麻岩和花岗质片麻岩(Yang *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2013). 古元古代盖层辽河群浅变质岩系主要分布在辽阳、海城、岫岩、营口、凤城、丹东、宽甸等地(2.17 ~ 1.85 Ga)(Zhao and Cawood, 2012),是一套绿片岩相—角闪岩相的变质岩系,下部为浪子山组火山岩—碎屑岩建造,主要由石英岩、变粒岩和二云片岩等组成;中部为大石桥组碳酸盐建造,主要由大理岩组成,夹少量云母片岩和碳质板岩;上部为盖县组碎屑岩—火山碎屑岩建造,主要由千枚岩、云母片岩、变质砂岩和石英岩等组成. 中元古代—古生代,辽东半岛经历稳定沉积作用形成一套以砂岩、粉砂岩和火山碎屑岩为主的巨厚沉积

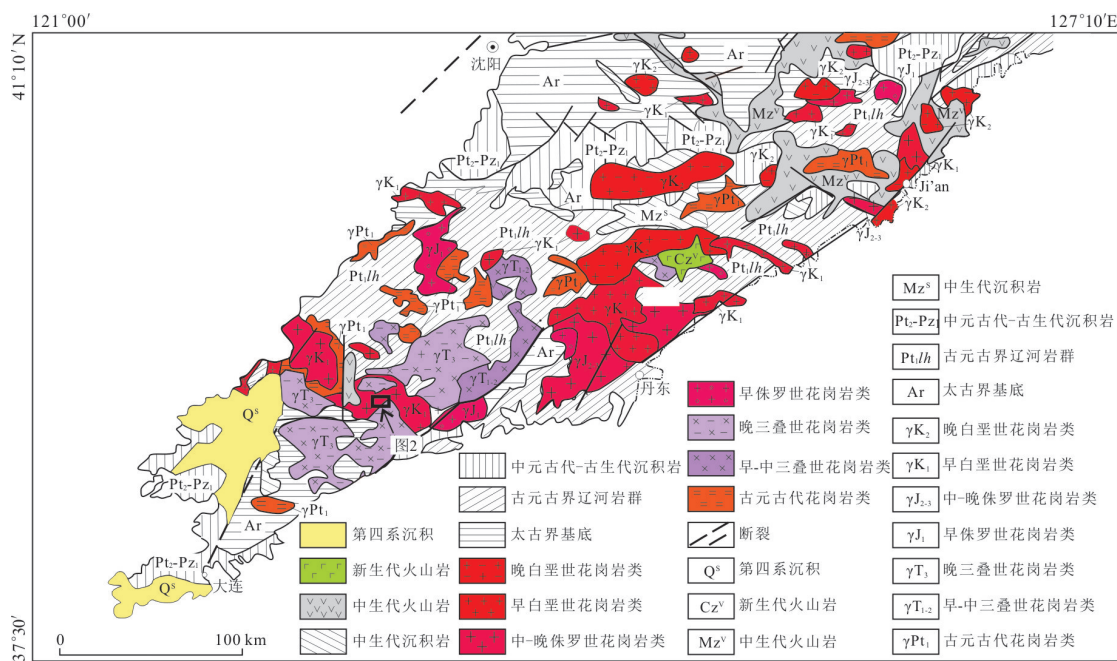


图 1 辽东半岛地质简图

Fig.1 Simplified geological map of Liaodong Peninsula

据 Zhang *et al.* (2016)

层.辽东半岛中生代时期经历了强烈的岩浆作用,三叠纪侵入岩成岩年龄多集中在 233~212 Ma,主要由碱性岩—闪长岩—辉绿岩—花岗岩组成(吴福元等,2005);侏罗世侵入岩主要由二云母二长花岗岩—花岗闪长岩—片麻状黑云母花岗岩组成(杨进辉等,2004);早白垩世花岗岩主要由似斑状花岗岩—花岗闪长岩—闪长岩—A 型花岗岩—晶洞花岗岩等组成(Yang *et al.*, 2001;吴福元等,2005).

2 实验样品和测试方法

2.1 实验样品

本次以丹东地区黄岭岩体为研究对象.黄岭岩体分布在鞍山岫岩县西南部,坐标为 123°21'53"E,39°22'15"N,呈不规则状产出,分布面积约为 35 km²(图 2),岩石类型为黑云母二长闪长岩,岩相分带不明显,暂未见包体.

岩石(18HLb)新鲜面呈灰白色,中—细粒结构,块状构造(图 3a).岩石主要由斜长石、钾长石、黑云母和少量石英组成.斜长石(约 60%),呈半自形板状、聚片双晶发育,少量具有蚀变,粒径为 2~1 mm;钾长石(约 20%),半自形粒状,具有卡式双晶,粒径为 1.5~1 mm;黑云母(约 10%),

呈鳞片状,粒度一般为 1~0.5 mm;石英(5%),他形粒状,粒径约为 0.5 mm;角闪石(约 5%),半自形柱状,粒度约为 0.5 mm(图 3b).副矿物主要为锆石、磷灰石及磁铁矿等.

2.2 测试方法

锆石定年样品采用常规方法进行粉碎,经过淘洗、采用电磁法分离,在双目镜下选出晶形和透明度好的单颗粒锆石,并进行锆石制靶和阴极发光图像分析,此项工作分别在河北廊坊诚信地质服务有限公司和北京锆年领航科技有限公司完成.锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析测试工作在武汉上谱分析有限责任公司完成,测试仪器为激光剥蚀多接受杯等离子质谱仪(LA-ICP-MS),剥蚀束斑直径为 44 μm.

锆石 Lu-Hf 同位素测定工作在武汉上谱分析有限责任公司完成.激光剥蚀系统为 GeolasHD,MC-ICP-MS 为 Neptune Plus,实验过程采用的剥蚀直径为 44 μm,采用单点剥蚀模式,详细操作流程及具体方法见 Zhang *et al.*(2016).

岩石主、微量和稀土元素测试在自然资源部沈阳地质调查中心完成.主量元素测试采用飞利浦 PW2404 X 射线荧光光谱仪测定,分析精度优于 5%.微量元素利用 HR-ICP-MS(Element I)电感耦

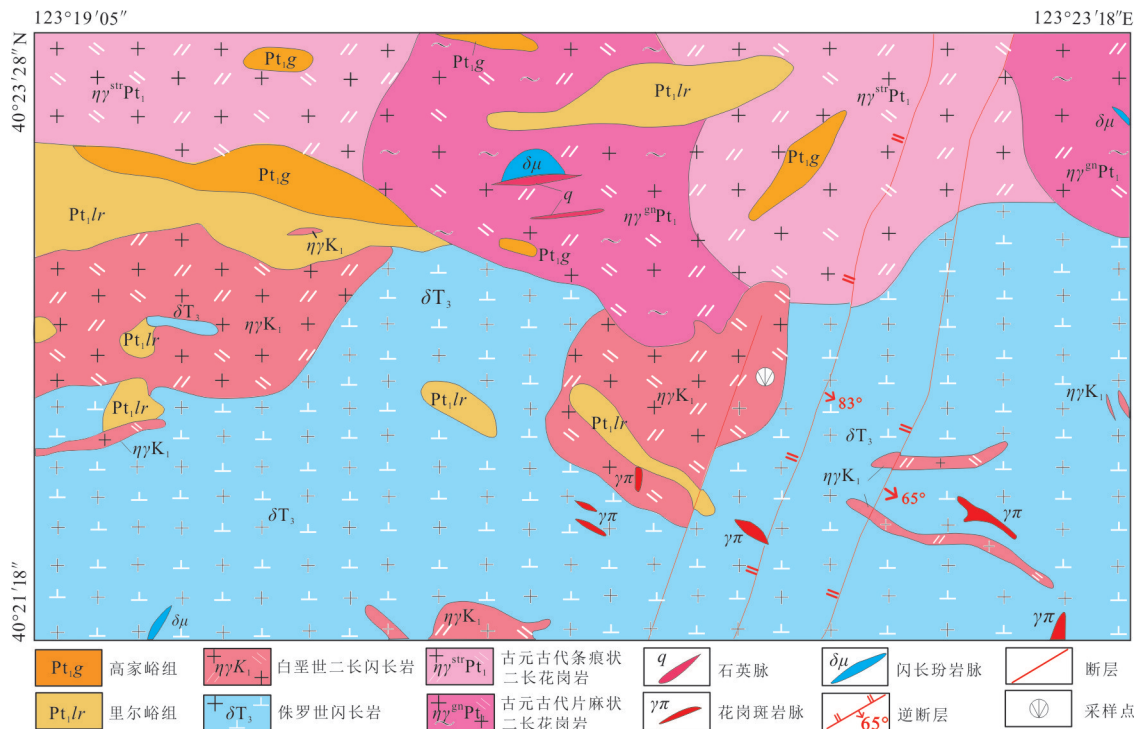


图 2 辽东丹东黄岭岩体地质简图

Fig.2 Simplified geological map of Huangling pluton, Dandong, Eastern Liaoning

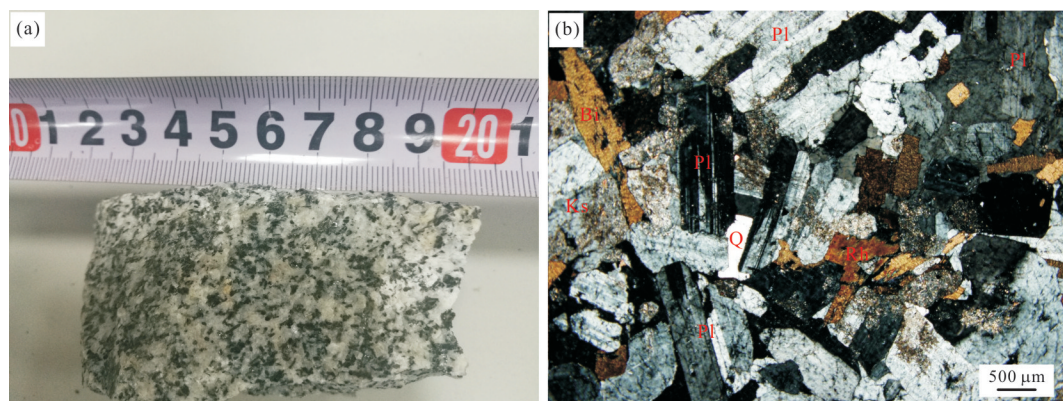
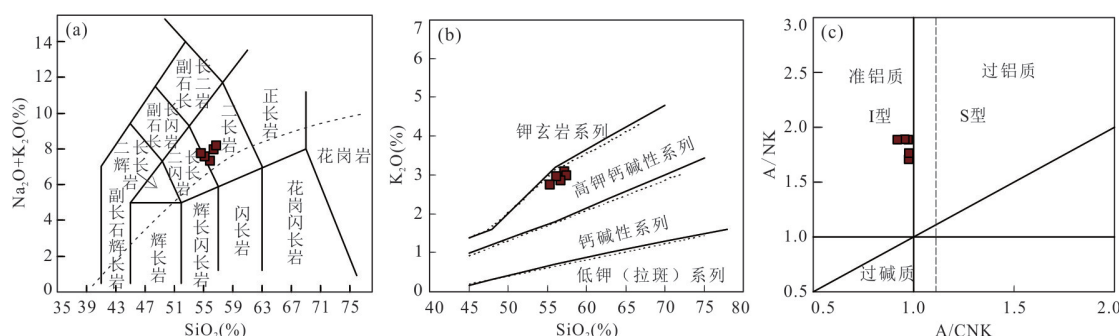


图3 辽东半岛丹东地区黑云母二长闪长岩手标本和镜下照片

Fig.3 Photograph and microscope photograph for biotite monzogranite rocks in Dandong, Liaodong Peninsula

a. 岩石标本照片; b. 显微镜下正交偏光照片; Q. 石英; Pl. 斜长石; Rh. 角闪石; Bi. 黑云母; Ks. 钾长石

图4 辽东半岛岫岩地区黑云母二长闪长岩 SiO_2 — $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 图解(a)、 SiO_2 — K_2O (b)和 A/CNK — A/NK 图解(c)Fig. 4 Plots of SiO_2 — $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (a), SiO_2 — K_2O (b) and A/CNK — A/NK (c) for biotite monzogranite rocks in Xiuyan area, Liaodong Peninsulaa. 据 Le Maitre *et al.* (1989); b. 据 Rickwood (1989); c. 据 Maniar and Piccoli (1989)

合等离子体质谱测试. 分析精度为: 当元素含量大于 10×10^{-6} , 精度优于 5%; 当含量小于 10×10^{-6} 时, 精度优于 10% (杨凤超等, 2016; 张朋等, 2016).

3 分析结果

3.1 全岩主量、微量、稀土元素组成

3.1.1 主量元素特征 元素地球化学分析结果见表 1. 黄岭岩体黑云母闪长岩 SiO_2 含量为 54.72%~56.55%, 具有相对较高的 Al_2O_3 (18.81%~20.31%), K_2O (2.82%~3.21%), MgO (1.52%~2.41%), Na_2O (4.24%~5.32%), $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (7.45%~8.20%). 在 SiO_2 — $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 图解上落入二长闪长岩及二长岩过渡区域 (图 4a). 在 SiO_2 — K_2O 图解上, 花岗闪长岩落入高钾钙碱性区域 (图 4b), 黄岭岩体 A/CNK 值为 0.93~0.99, 在 A/CNK — A/NK 判别图

解中, 落入准铝质 I 型花岗岩区域 (图 4c).

3.1.2 稀土、微量元素特征 稀土元素分析结果 (表 1) 表明, 黄岭岩体的 ΣREE 为 159.91×10^{-6} ~ 167.97×10^{-6} , 平均值为 163.94×10^{-6} , LREE/HREE 为 18.18~20.58, 平均值为 19.78, δEu 为 0.91~0.93, 平均值为 0.92, Nb/U 值介于 3.81~13.44, Ta/U 值介于 0.11~1.48, Nd/Th 值介于 5.10~5.97. 在微量元素原始地幔标准化配分图解 (图 5a) 上呈右倾曲线, 具有轻稀土元素富集, 重稀土亏损特点, Eu 正异常明显, 表明源区斜长石没有残留. 在原始地幔标准化的微量元素蛛网图 (图 5b) 上, 高场强元素 (Nb 、 P 、 Ti) 明显亏损, 大离子亲石元素 (Rb 、 Zr 、 K) 富集.

3.2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄

黄岭岩体的锆石阴极发光 CL 图像 (图 6) 显示锆石呈柱状—长柱状, 长轴、短轴比为 4:1~1:1, 粒度为 120~200 μm , 均发育振荡环带, 表明其为岩浆

表 1 辽宁半岛岫岩黄岭黑云母二长闪长岩体的主量(%)、微量(10^{-6})元素分析结果

Table 1 Major (%) and trace (10^{-6}) element concentrations of the biotite monzodiorite rocks from Xiuyan area, Liaodong Peninsula

样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ω(LOI)	ω(SUM)	Na ₂ O+ K ₂ O	A/ CNK	A/NK	Rb	Ga
18HL-1	54.715	1.117	20.312	4.816	2.128	0.103	1.957	5.457	4.974	2.816	0.340	0.79	99.52	7.79	0.96	1.81	79.3	25.9
18HL-2	56.549	0.939	20.273	4.214	1.836	0.086	1.523	4.773	5.317	2.879	0.270	0.95	99.61	8.20	0.99	1.71	81.5	24.0
18HL-3	56.377	0.968	20.203	4.402	1.791	0.091	1.600	4.800	5.219	2.830	0.280	0.93	99.49	8.05	0.99	1.73	82.4	26.2
18HL-4	55.880	1.004	18.893	4.950	1.565	0.108	2.407	5.434	4.244	3.207	0.367	1.31	99.37	7.45	0.93	1.81	120	26.0
18HL-5	55.078	1.005	19.805	4.838	2.094	0.096	2.200	5.431	4.698	2.973	0.373	1.07	99.66	7.67	0.95	1.81	81.0	25.8
样品	Ba	Th	U	Nb	Ta	La	Ce	Pr	Sr	Nd	Zr	Hf	Sm	Eu	Ti	Gd	Tb	Dy
18HL-1	1 900	6.885	1.165	11.72	0.616	67.159	112.213	11.918	1 300	40.572	541.39	11.993	5.254	2.608	6 695	4.822	0.554	2.618
18HL-2	2 100	7.037	1.240	10.61	1.830	78.682	119.197	11.950	1 300	38.720	487.30	10.569	4.379	2.809	5 628	4.247	0.444	1.959
18HL-3	2 100	7.832	1.684	10.82	1.038	86.918	136.555	13.340	1 300	42.457	520.29	12.581	4.644	2.745	5 802	4.727	0.484	2.157
18HL-4	1 800	9.242	4.253	16.19	0.460	43.291	102.414	12.687	1 100	47.105	278.87	7.387	7.267	2.504	6 018	5.990	0.843	4.409
18HL-5	1 700	6.766	0.968	13.02	0.380	52.801	93.309	11.144	1 100	40.374	335.92	7.748	5.677	2.458	6 024	4.831	0.606	2.987
样品	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Pb	K	P	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	δEu	δCe	L _N /Y _N		
18HL-1	12.012	0.528	1.689	0.253	1.659	0.265	17.720	2 337	1 484	159.91	152.24	7.67	18.18	0.91	1.07	27.13		
18HL-2	8.736	0.413	2.126	0.195	1.313	0.218	18.250	2 390	1 178	161.93	154.87	7.06	18.98	0.92	1.07	28.52		
18HL-3	9.517	0.458	2.975	0.235	1.654	0.280	18.510	2 349	1 222	163.94	157.50	6.44	19.78	0.92	1.07	29.90		
18HL-4	22.019	0.879	2.423	0.427	2.653	0.379	19.070	2 662	1 602	165.96	160.13	5.83	20.58	0.93	1.08	31.28		
18HL-5	14.377	0.593	1.634	0.282	1.812	0.277	18.265	2 468	1 630	167.97	162.76	5.21	21.38	0.93	1.08	32.66		

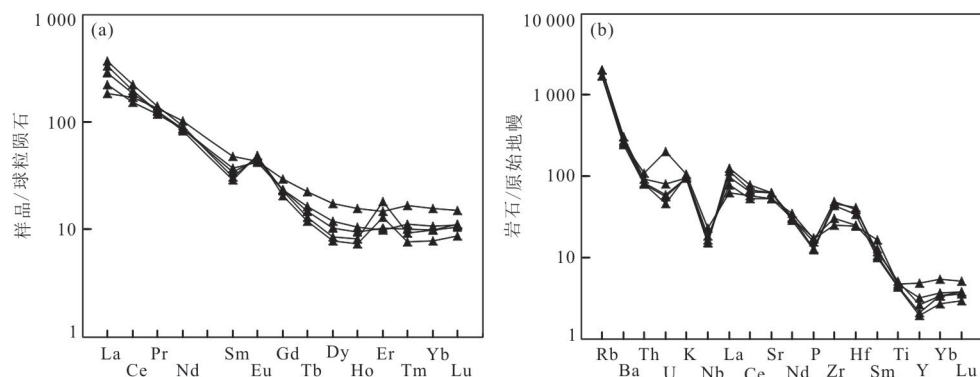


图 5 辽东半岛岫岩地区黑云母二长闪长岩的稀土配分曲线(a)和微量蛛网图(b)

Fig. 5 Rare earth element distribution curves (a) and trace element spider diagram (b) for biotite monzodiorite rocks in Xiuyan area, Liaodong Peninsula

标准值据 Sun and Mcdonough(1989)

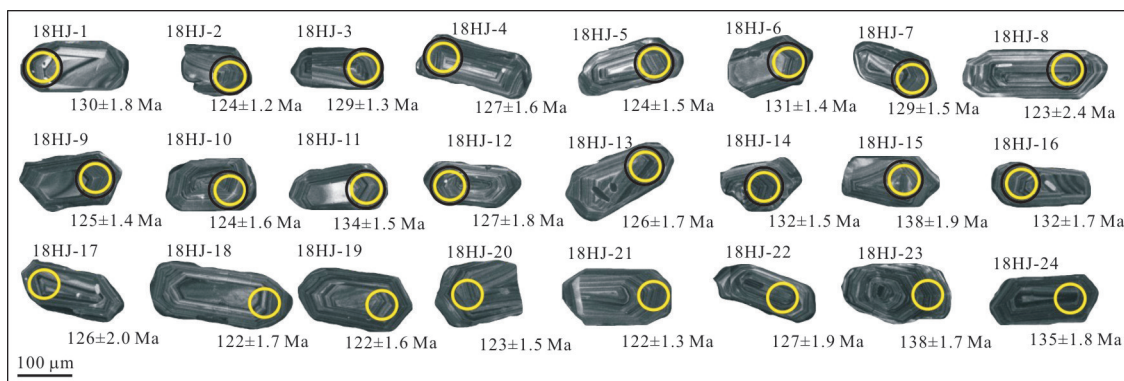


图 6 辽东半岛岫岩地区黑云母二长闪长岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig.6 Zircon CL image of biotite monzodiorite rocks in Xiuyan area, Liaodong Peninsula

黄色圈为锆石 U-Pb 测定点;黑色点为 Hf 测试点

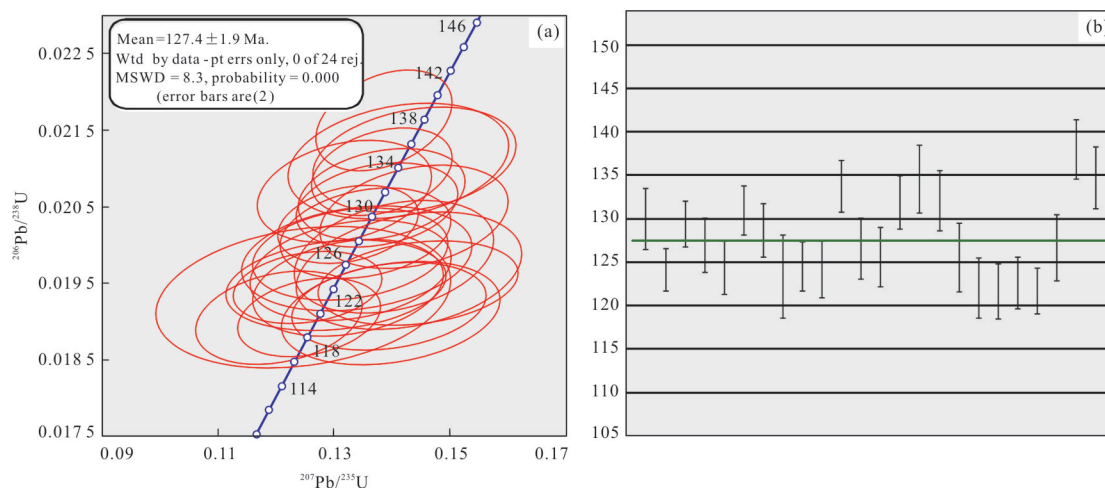


图 7 辽东半岛岫岩地区黑云母二长闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄协和图(a)和加权平均年龄图(b)

Fig.7 LA-ICP-MS U-Pb age of biotite monzodiorite rocks in Xiuyan area, Liaodong Peninsula

成因锆石(Belousova *et al.*, 2002). 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果见表 2, 本次得到加权平均

年龄为 127.4 ± 1.9 Ma (图 7), 代表了黑云母二长闪长岩的结晶年龄.

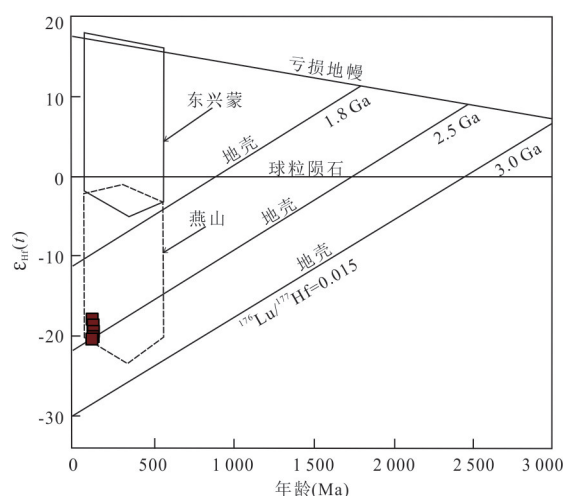


图 8 辽东半岛岫岩地区黑云母二长闪长岩的锆石 Lu-Hf 同位素特征图解

Fig. 8 Lu-Hf diagram of the biotite monzodiorite rocks of Dingqishan rocks in Xiuyan area, Liaodong Peninsula
据 Yang *et al.* (2006)

3.3 锆石 Hf 同位素组成

锆石 Hf 同位素测试结果见表 3. $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值变化范围为 0.030 151~0.117 961, 计算 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围为 -20.1~-18.0, T_{DM2} 值变化范围为 2 316~2 450 Ma. 样品点均落在球粒陨石演化线之下, 在 1.8 Ga 和 2.5 Ga 地壳演化之间(图 8).

4 讨论

4.1 岩石成因和岩浆源区

黄岭二长闪长岩 SiO_2 含量为 54.72%~56.55%, 为一典型的中性岩体. 关于中性岩的成因研究, 主要观点有: (1) 受富水的流体交代的地幔楔橄榄岩部分熔融, (2) 幔源岩浆同化混染和分离结晶, (3) 地壳物质部分熔融 (Arnaud *et al.*, 1992; Thompson, 1996).

岩石地球化学特征显示, 黄岭二长闪长岩为准铝质高钾钙碱性岩石系列, 具有较高的 K_2O 含量 (2.816%~3.207%) 和总碱含量 (7.45%~8.20%), 黄岭岩体正 Eu 异常较为明显, 说明岩浆源区斜长石没有残留, 岩石 Nd/Th 值介于 5.10~5.97, 与地幔 Nd/Th 大于 15 相比更接近于壳源岩石的 Nd/Th 值 (Nd/Th=3) (Bea *et al.*, 2001). 岩石中的 Nb/U 和 Ce/Pb 比值能够摒除岩浆演化过程的影响而反映源区性质 (汪岩等, 2013), 地幔来源的岩浆 Nb/U 和 Ce/Pb 分别为 47 和 27 (Hofmann, 1988), 地壳来源的 Nb/U 和 Ce/Pb 平均值为 6.2 和 3.9, 黄岭岩体

Nb/U 和 Ce/Pb 值分别为 3.81~13.44, 5.11~7.38, 更接近于地壳来源的 Nb/U 和 Ce/Pb, 结合强不相容元素 Nb/Ta 值为 5.80~35.17, 平均值为 20.93, 高于原始地幔的 Nb/Ta 比值 (17.8 ± 1.9), 笔者认为黄岭岩体的可能为中下地壳岩石的部分熔融的产物.

研究表明, 除 Sr-Nd 同位素能够对岩浆源区性质提供很好的信息之外, 锆石 Hf 同位素也能够提供很好的制约 (吴福元等, 2007; 杨凤超等, 2016; 张朋等, 2019). Kinny and Mass (2003) 研究显示, 若岩浆锆石具有较低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值, 岩石源区一般为地壳或经过地壳物质混染, 相反, 若锆石具有较高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值, 岩石则为地幔或有幔源组分分异的新生壳源物质部分熔融形成. 本次获得的黄岭二长闪长岩岩体 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值在 0.028 213 1~0.028 218 9, 且变化相对狭小, 说明锆石 Hf 组成均一, 岩浆源区单一. 所测样品中锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均 < 0 , $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解中, 样品均分布在亏损地幔演化线之下, 在 1.8 Ga 地壳演化线以下(图 8). 样品的二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 均大于单阶段模式年龄 (t_{DM1}), 因此综合分析, 黄岭岩体原岩为古元古代古老下地壳部分熔融形成.

4.2 构造背景

华北东部在中生代早白垩世发生了强烈的岩石圈减薄和构造格架的转换作用, 由挤压构造向伸展构造的重大转折事件始于 140~150 Ma, 终于 100~110 Ma, 峰值时限为 100~120 Ma (翟明国等, 2004; 侯红星等, 2016). 辽东地区自侏罗世以来强烈的构造-岩浆活动正是华北克拉通岩石圈减薄和克拉通破坏作用的缩影, 特别是在早白垩世时期, 伸展作用异常强烈 (刘俊来等, 2011; Lin *et al.*, 2015). 近些年来, 东北地区发现大量的早白垩世非造山环境的 A 型花岗岩, 如: 辽东地区的千山岩体、四平街岩体、帽盔山岩体和清凉山岩体, 大兴安岭地区的卧都河岩体、巴尔哲岩体以及燕辽地区的雾灵山、千层山岩体 (Wu *et al.*, 2011; 刘永俊等, 2020), 均显示东北地区在早白垩世地质演化与伸展作用有关 (孙金凤和杨进辉, 2009). 辽西地区发育的北北东向高镁火山盆地构造也反映东北地区在早白垩世处于伸展的构造背景 (Pang *et al.*, 2015). 辽东地区出现的多个早白垩世变质核杂岩、拆离断层构造有力地证明了岩石圈在辽东地区发生大规模的减薄作用和伸展构造. 俯冲造成了地壳伸展和岩石圈减薄, 促使软流圈地幔发生大量岩浆底侵作

表 2 辽东半岛岫岩地区黄岭岩体中黑云母二长闪长岩锆石 U-Pb 分析结果
Table 2 Zircon U-Pb data of the biotite monzodiorite in Xiuyan area, Liaodong Peninsula

测试点号	元素(10^{-6})		Th/U	同位素比值						年龄值 (Ma)						
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$1\sigma(\%)$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma(\%)$	
				1σ		1σ		1σ			1σ					
18HLZ-01	1 011	598	1.69	0.051 4	0.002 5	0.143 8	0.006 6	0.020 4	0.000 3	0.000 3	136	5.884 874	261	112.945 0	130	1.745 006
18HLZ-02	1 044	627	1.67	0.046 7	0.002 0	0.125 5	0.005 2	0.019 4	0.000 2	0.000 2	120	4.726 456	31.6	99.990 0	124	1.219 671
18HLZ-03	1 181	767	1.54	0.047 4	0.001 8	0.132 4	0.005 0	0.020 3	0.000 2	0.000 2	126	4.442 277	77.9	75.920 0	129	1.318 884
18HLZ-04	483	378	1.28	0.048 9	0.002 7	0.132 8	0.006 9	0.019 9	0.000 2	0.000 2	127	6.167 568	146	162.015 0	127	1.556 909
18HLZ-05	252	315	0.80	0.048 1	0.002 8	0.130 4	0.007 8	0.019 5	0.000 2	0.000 2	124	6.964 949	102	129.610 0	124	1.531 710
18HLZ-06	1 164	797	1.46	0.048 6	0.002 0	0.137 4	0.005 7	0.020 5	0.000 2	0.000 2	131	5.085 386	128	99.985 0	131	1.424 820
18HLZ-07	769	536	1.43	0.048 7	0.002 1	0.135 5	0.006 0	0.020 2	0.000 2	0.000 2	129	5.377 254	132	99.060 0	129	1.526 889
18HLZ-08	89.3	135	0.66	0.046 5	0.004 2	0.124 7	0.010 4	0.019 3	0.000 4	0.000 4	119	9.377 040	33.4	199.970 0	123	2.389 870
18HLZ-09	378	424	0.89	0.053 8	0.002 7	0.144 5	0.007 0	0.019 5	0.000 2	0.000 2	137	6.252 107	365	108.322 5	125	1.424 726
18HLZ-10	203	273	0.74	0.049 7	0.002 9	0.132 4	0.006 7	0.019 4	0.000 3	0.000 3	126	6.020 744	189	135.167 5	124	1.634 726
18HLZ-11	1 009	648	1.56	0.048 0	0.001 8	0.138 3	0.005 0	0.021 0	0.000 2	0.000 2	132	4.419 168	98.2	87.027 5	134	1.477 764
18HLZ-12	187	272	0.69	0.049 3	0.003 1	0.133 9	0.008 1	0.019 8	0.000 3	0.000 3	128	7.265 798	161	-47.217 5	127	1.771 254
18HLZ-13	365	296	1.23	0.050 0	0.002 9	0.132 9	0.007 1	0.019 7	0.000 3	0.000 3	127	6.349 179	195	137.017 5	126	1.697 877
18HLZ-14	656	482	1.36	0.048 3	0.002 0	0.138 2	0.005 9	0.020 7	0.000 2	0.000 2	131	5.243 167	122	99.987 5	132	1.541 785
18HLZ-15	228	354	0.64	0.049 1	0.002 8	0.141 1	0.007 8	0.021 1	0.000 3	0.000 3	134	6.915 571	154	135.167 5	135	1.948 628
18HLZ-16	533	466	1.14	0.046 5	0.002 2	0.131 8	0.006 1	0.020 7	0.000 3	0.000 3	126	5.505 815	33.4	166.645 0	132	1.721 154
18HLZ-17	352	321	1.10	0.053 0	0.003 0	0.142 9	0.007 9	0.019 7	0.000 3	0.000 3	136	7.057 890	328	129.612 5	126	1.980 885
18HLZ-18	204	277	0.74	0.053 1	0.003 2	0.139 8	0.007 7	0.019 1	0.000 3	0.000 3	133	6.858 646	345	135.167 5	122	1.745 131
18HLZ-19	593	450	1.32	0.046 2	0.002 4	0.120 5	0.005 9	0.019 0	0.000 2	0.000 2	116	5.314 884	5.7	122.210 0	122	1.576 904
18HLZ-20	386	360	1.07	0.052 3	0.002 5	0.139 5	0.006 8	0.019 2	0.000 2	0.000 2	133	6.098 624	298	109.242 5	123	1.482 205
18HLZ-21	490	522	0.94	0.047 9	0.002 0	0.125 7	0.005 0	0.019 1	0.000 2	0.000 2	120	4.537 776	94.5	99.990 0	122	1.328 618
18HLZ-22	325	311	1.05	0.051 0	0.002 6	0.140 4	0.007 0	0.019 8	0.000 3	0.000 3	133	6.253 271	243	116.650 0	127	1.901 799
18HLZ-23	2 316	1 134	2.04	0.046 1	0.001 6	0.138 6	0.004 8	0.021 6	0.000 3	0.000 3	132	4.277 740	400	-316.625 0	138	1.699 279
18HLZ-24	404	403	1.00	0.049 5	0.002 6	0.143 9	0.007 2	0.021 1	0.000 3	0.000 3	137	6.352 482	172	122.205 0	135	1.771 823

表3 辽东半岛丹东地区黄岭岩体黑云母二长闪长岩锆石 Lu-Hf 分析结果

Table 3 Zircon Lu-Hf data of the biotite monzodiorite from Huangling pluton in Xiuyan area, Liaodong Peninsula

测试点	年龄 (Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	T _{DM1} (Ma)	T _{DM2} (Ma)	f _{Lu/Hf}
SGL-1	130	0.054 399	0.000 959	0.001 596	0.000 019	0.282 167	0.000 012	-21.4	-18.7	1 553	2 365	-0.95
SGL-2	124	0.057 702	0.000 458	0.001 757	0.000 014	0.282 131	0.000 015	-22.7	-20.1	1 612	2 450	-0.95
SGL-3	129	0.073 682	0.000 557	0.002 104	0.000 016	0.282 170	0.000 015	-21.3	-18.6	1 571	2 362	-0.94
SGL-4	127	0.030 151	0.000 145	0.000 909	0.000 008	0.282 170	0.000 011	-21.3	-18.6	1 521	2 357	-0.97
SGL-5	124	0.030 753	0.000 354	0.000 930	0.000 013	0.282 189	0.000 011	-20.6	-18.0	1 495	2 316	-0.97
SGL-6	131	0.061 258	0.001 757	0.001 768	0.000 039	0.282 146	0.000 013	-22.1	-19.4	1 590	2 412	-0.95
SGL-7	129	0.073 866	0.001 909	0.002 097	0.000 044	0.282 186	0.000 014	-20.7	-18.1	1 547	2 326	-0.94
SGL-8	123	0.026 114	0.000 246	0.000 808	0.000 006	0.282 182	0.000 011	-20.9	-18.2	1 500	2 332	-0.98
SGL-9	125	0.042 381	0.000 740	0.001 260	0.000 019	0.282 179	0.000 012	-21.0	-18.3	1 522	2 340	-0.96
SGL-10	124	0.026 121	0.000 546	0.000 796	0.000 015	0.282 168	0.000 011	-21.4	-18.7	1 520	2 364	-0.98
SGL-11	134	0.049 895	0.000 331	0.001 455	0.000 012	0.282 149	0.000 014	-22.0	-19.2	1 573	2 402	-0.96
SGL-12	127	0.025 482	0.000 387	0.000 784	0.000 009	0.282 175	0.000 009	-21.1	-18.4	1 510	2 347	-0.98
SGL-13	126	0.056 471	0.000 577	0.001 695	0.000 021	0.282 164	0.000 012	-21.5	-18.9	1 562	2 375	-0.95
SGL-14	132	0.055 959	0.000 204	0.001 653	0.000 006	0.282 160	0.000 012	-21.7	-18.9	1 566	2 381	-0.95
SGL-15	135	0.044 412	0.000 536	0.001 322	0.000 010	0.282 167	0.000 015	-21.4	-18.6	1 542	2 361	-0.96
SGL-16	132	0.117 961	0.002 183	0.003 329	0.000 062	0.282 158	0.000 015	-21.7	-19.1	1 642	2 392	-0.90

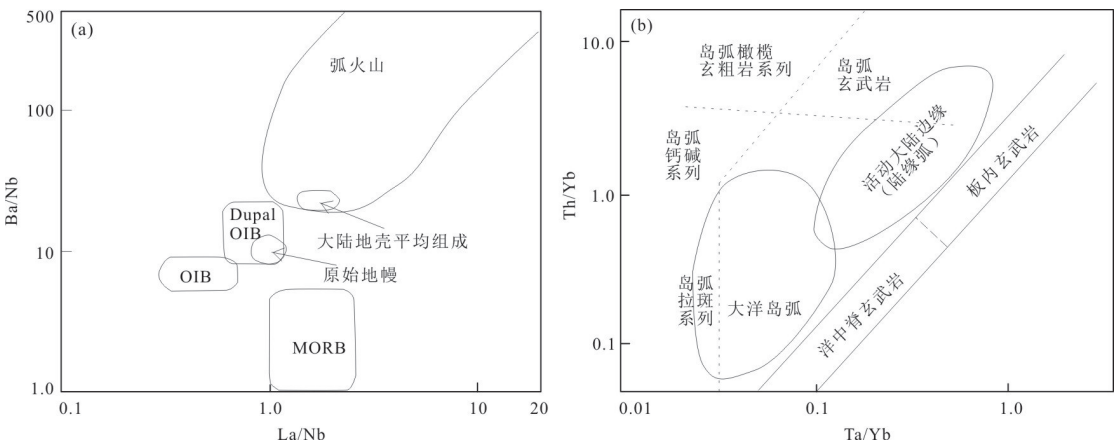


图9 辽东半岛黄岭岩体二长闪长岩构造环境判别图解

Fig.9 Discrimination diagrams for tectonic setting of biotite monzodiorite in Liaodong Peninsula
a. La/Yb—Ba/Nb 判别图(据 White and Patchett, 1984); b. Ta/Yb—Th/Yb 判别图(据 Wood, 1980)

用,形成了广泛分布的晚中生代花岗质岩石(申亮等,2011;刘杰勋等,2016).辽东半岛区域构造研究表明,辽东半岛丹东地区在晚侏罗世经历一期NW向挤压变形(李三忠等,2004).杨进辉等(2004)通过对丹东西南部片麻状的黑沟岩体开展Ar-Ar年代学研究,得出该岩体在143 Ma经历推覆挤压,在121~113 Ma经历地壳伸展.本次获得黄岭岩体成岩时代为127.4±1.9 Ma,岩石地球化学数据显示,样品在La/Nb—Ba/Nb和Ta/Yb—Th/Yb判别图解中(图9a,9b),样品落入火山弧区(活动大陆边缘),说明黄

岭岩体形成于早白垩世活动大陆边缘构造背景.研究表明,中生代中侏罗世,古太平洋板块向欧亚大陆俯冲挤压,而在早白垩世古太平洋板块折返,发生挤压向伸展转换的构造转换.辽东半岛在早白垩世经历了强烈的SEE-NWW向伸展作用,产生了强烈的构造岩浆活动(杨进辉等,2008),本次获得黄岭岩体成岩时代为早白垩世,成岩时代与早白垩世古太平洋板块向欧亚板块俯冲后的伸展折返相一致,综上,认为黄岭岩体形成于伸展的构造背景.

5 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定结果表明, 黄岭黑云母二长闪长岩形成时代为 127.4 ± 1.9 Ma, 是早白垩世构造岩浆活动产物。

(2) 岩相学和元素地球化学特征显示, 黄岭岩体为 I 型花岗岩; 锆石 Hf 同位素显示, 黄岭岩体 ϵ_{Hf} (t) 均小于 0, 结合古老的二阶段模式年龄, 认为黄岭岩体原岩为古老下地壳部分熔融的产物。

(3) 黄岭岩体形成于古太平洋板块向欧亚板块的俯冲后的伸展环境, 是华北克拉通岩石圈减薄和克拉通破坏作用的缩影。

致谢: 感谢两位匿名审稿人和编辑部同志为完善本文提出的宝贵的修改建议, 在实验测试过程中得到了沈阳地质调查中心实验测试中心同事的帮助, 锆石 Hf 同位素测试得到了南京大学孙盼老师的帮助, 作者在此表示诚挚的感谢!

References

- Arnaud, N. O., Vidal, P., Tapponnier, P., et al., 1992. The High K_2O Volcanism of Northwestern Tibet: Geochemistry and Tectonic Implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 111(2–4): 351–367.
- Bea, F., Arzamastsev, A., Montero, P., et al., 2001. Anomalous Alkaline Rocks of Soustov, Kola: Evidence of Mantle-Derived Metasomatic Fluids Affecting Crustal Materials. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140(5): 554–566.
- Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S. Y., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622.
- Hofmann, A. W., 1988. Chemical Differentiation of the Earth: The Relationship between Mantle, Continental Crust, and Oceanic Crust. *Earth and Planetary Science Letter*, 90(3): 297–314.
- Hou, H.X., Zhang, D.H., Zhang, R.Z., 2016. The Chronology, Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Mesozoic Shiyagou Hidden Granite at the East Qinling. *Earth Science*, 41(10): 1665–1682 (in Chinese with English abstract).
- Kinny, P.D., Mass, R., 2003. Lu-Hf and Sm-Nd Isotope Systems in Zircon. In: Hanchar, J. M., Hoskin, P. W. O., eds., *Zircon. Washington: Mineralogical Society of America*, 53: 327–341.
- Li, S.Z., Hao, D.F., Zhao, G.C., et al., 2004. Geochemical Features and Origin of Dandong Granite. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1417–1423 (in Chinese with English abstract).
- Lin, W., Ji, W.B., Faure, M., et al., 2015. Early Cretaceous Extensional Reworking of the Triassic HP-UHP Metamorphic Orogen in Eastern China. *Tectonophysics*, 662: 256–270.
- Liu, J.L., Ji, M., Shen, L., et al., 2011. Early Cretaceous Extensional Structures in the Liaodong Peninsula: Structural Associations, Geochronological Constraints and Regional Tectonic Implications. *Science in China (Series D: Earth Science)*, 41(5): 618–637 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. L., Shen, L., Ji, M., et al., 2013. The Liaonan/Wanfu Metamorphic Core Complexes in the Liaodong Peninsula: Two Stages of Exhumation and Constraints on the Destruction of the North China Craton. *Tectonics*, 32(5): 1121–1141.
- Liu, J.X., Guo, W., Zhu, K., 2016. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of the Early Cretaceous Intrusive Rocks from Xiuyuan Area, Eastern Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 2889–2900 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.J., Han, X.T., Liu, Z.H., et al., 2020. Zircon U-Pb Ages, Geochemical Characteristics and Geological Significance of Early Cretaceous Granites in Fengcheng Area, Eastern Liaoning Province. *Earth Science*, 45(1): 145–155 (in Chinese with English abstract).
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society America Bulletin*, 101: 635–643.
- Pang, C. J., Wang, X. C., Xu, Y. G., et al., 2015. Pyroxene Derived Early Cretaceous Lavas in the Liaodong Peninsula: Implication for Metasomatism and Thinning of the Lithospheric Mantle beneath North China Craton. *Lithos*, 227: 77–93. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.03.022>
- Rickwood, P. C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams Which Use Oxides of Major and Minor Elements. *Lithos*, 22(4): 247–263.
- Shen, L., Liu, J. L., Hu, L., et al., 2011. The Dayingzi Detachment Fault System in Liaodong Peninsula and Its Regional Tectonic Significance. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 41(4): 437–451 (in Chinese).
- Sun, J.F., Yang, J.H., 2009. Early Cretaceous A-Type Granites in the Eastern North China Block with Relation to Destruction of the Craton. *Earth Science*, 34(1): 137–147 (in Chinese with English abstract).

- 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.
- Thompson, A. B., 1996. Fertility of Crustal Rocks during Anatexis. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 87 (1–2): 1–10.
- Wang, Y., Fu, J. Y., Na, F. C., et al., 2013. Geochemical Characteristics and Zircon U-Pb Age of the Gabbro-Diorite in Jalaid Banner of Inner Mongolia and Their Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 32 (10):1525–1535 (in Chinese with English abstract).
- White, W. M., Patchett, J., 1984. Hf-Nd-Sr Isotopes and Incompatible Element Abundances in Island Arcs: Implications for Magma Origins and Crust-Mantle Evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 67(2): 167–185.
- Wood, D. A., 1980. The Application of a Th-Hf-Ta Diagram to Problems of Tectonomagmatic Classification and to Establishing the Nature of Crustal Contamination of Basaltic Lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 11–30.
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007. Some Problems on the Genesis of Granite. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (6) : 1217–1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Ge, W. C., et al., 2011. Geochronology of the Phanerozoic Granitoids in Northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2010.11.014>
- Wu, F. Y., Yang, J. H., Liu, X. M., 2005. Geochronological Framework of the Mesozoic Granitic Magmatism in the Liaodong Peninsula, Northeast China. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 305–317 (in Chinese with English abstract).
- Yang, F. C., Sun, J. G., Song, Y. H., et al., 2016. SHRIMP U-Pb Age, Hf Isotope Composition and Geochemical Characteristics of Neoproterozoic Granitic Complex in Liaodong Lianshanguan Area, NE China. *Earth Science*, 41 (12): 2008–2018 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Liu, X. M., et al., 2007. Petrogenesis and Geological Significance of the Jurassic Xiaoheshan Pluton in the Liaodong Peninsula, East China: In-Situ Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopic Analysis. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 26(1):29–43.
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Luo, Q. H., et al., 2004. Deformation Age of Jurassic Granites in the Dandong Area, Eastern China: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronological Constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5):1241–1250 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Shao, J. A., et al., 2006. Constraints on the Timing of Uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246: 336–352.
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S. A., et al., 2001. Tracing Magma Mixing in Granite Genesis: In Situ U-Pb Dating and Hf Isotope Analysis of Zircon. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153: 177–190.
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Zhong, S. L., et al., 2008. The Extensional Geodynamic Setting of Early Cretaceous Granitic Intrusions in the Eastern North China Craton: Evidence from Laser $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of K-Bearing Minerals. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1175–1184 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, G. M., Meng, Q. R., Liu, J. M., et al., 2004. Geological Features of Mesozoic Tectonic Regime Inversion in Eastern North China and Implication for Geodynamics. *Earth Science Frontiers*, 11 (3) : 285–297 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Chen, D., Kou, L. L., et al., 2015. Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Pb Isotopes of the Wolongquan Intrusion in Liaodong and Its Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(10): 1762–1772 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Chen, D., Kou, L. L., et al., 2016. Chronology, Geochemistry and Hf Isotope of Monzonitic Granite from the Dongbeigou Molybdenum Deposit in Kuandian, Liaoning Province. *Geology in China*, 43(6): 2092–2103 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Zhao, Y., Kou, L. L., et al., 2016. Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Geochronology of Copper-Molybdenum deposits in Southeast Liaoning Province, China. *International Geology Review*, 58: 1481–1491.
- Zhang, P., Zhao, Y., Kou, L. L., et al., 2019. Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopes and Geological Significance of Mesozoic Granites in Dandong Area, Liaodong Peninsula. *Earth Science*, 44(10): 3297–3313 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Cawood, P., 2012. Precambrian Geology of China. *Precambrian Research*, 222–223: 13–54.
- Zhu, R. X., Yang, J. H., Wu, F. Y., 2012. Timing of Destruction of the North China Craton. *Lithos*, 149: 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.013>

附中文参考文献

- 侯红星,张德会,张荣臻,2016.东秦岭中生代石瑶沟隐伏花岗岩年代学、地球化学特征及地质意义.地球科学,41(10):1665—1682.
- 李三忠,郝德峰,赵国春,等,2004.丹东花岗岩的地球化学特征及其成因.岩石学报,20(6):1417—1423.
- 刘俊来,纪沫,申亮,等,2011.辽东半岛早白垩世伸展构造组合、形成时代及区域构造内涵.中国科学(D辑:地球科学),41(5):618—637.
- 刘杰勋,郭巍,朱凯,2016.辽东岫岩地区早白垩世侵入岩的年代学、地球化学及地质意义.岩石学报,32(9):2889—2900.
- 刘永俊,韩晓涛,刘正宏,等,2020.辽东风城地区早白垩世花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义.地球科学,45(1):145—155.
- 申亮,刘俊来,胡玲,等,2011.辽东半岛大营子拆离断层系及其区域构造意义.中国科学(D辑:地球科学),41(4):437—451.
- 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.地球科学,34(1):137—147.
- 汪岩,付俊彧,那福超,等,2013.内蒙古扎赉特旗辉长岩闪长岩地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄.地质通报,32(10):1525—1535.
- 吴福元,李献华,杨进辉,等,2007.花岗岩成因研究的若干问题.岩石学报,23(6):1217—1238.
- 吴福元,杨进辉,柳小明,2005.辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架.高校地质学报,11(3):305—317.
- 杨凤超,孙景贵,宋运红,等,2016.辽东连山关地区新太古代花岗杂岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及地质意义.地球科学,41(12):2008—2018.
- 杨进辉,吴福元,罗清华,等,2004.辽宁丹东地区侏罗纪花岗岩的变形时代: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学制约.岩石学报,20(5):1241—1250.
- 杨进辉,吴福元,钟孙霖,等,2008.华北东部早白垩世花岗岩侵位的伸展地球动力学背景:激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学证据.岩石学报,24(6):1175—1184.
- 翟明国,孟庆任,刘建明,等,2004.华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨.地学前缘,11(3):285—297.
- 张朋,陈冬,寇林林,等,2015.辽东卧龙泉岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素特征及其构造意义.地质学报,89(10):1762—1772.
- 张朋,陈冬,寇林林,等,2016.辽东宽甸东北沟钼矿二长花岗岩年代学、地球化学及 Hf 同位素特征.中国地质,43(6):2092—2103.
- 张朋,赵岩,寇林林,等,2019.辽东半岛丹东地区中生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义.地球科学,44(10):3297—3313.