

# 辽东黑沟地区古元古代碱长花岗岩 年代学、地球化学、Hf 同位素 特征及其对辽吉造山带构造演化的制约

杨玉伟<sup>1)</sup>, 余超<sup>2)</sup>, 王广伟<sup>2)</sup>, 苏特<sup>2)</sup>, 杨新宇<sup>2)</sup>, 张天元<sup>2)</sup>

1) 辽宁省物测勘察院有限责任公司, 沈阳, 110031; 2) 辽宁省地质矿产调查院有限责任公司, 沈阳, 110031

**内容提要:**华北克拉通东部造山带内古元古代中期(2.1~2.2Ga)岩浆记录了造山带早期重要的地壳演化信息,对探讨辽吉造山带古元古代地质演化过程具有十分重要的意义。本文选择了辽东黑沟地区古元古代碱长花岗岩进行岩石学、地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究。黑沟碱长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果为  $2186.5 \pm 6.5$  Ma, 形成时代为古元古代。岩石为碱性、弱过铝质 A 型花岗岩, 岩石富硅、碱, 贫钙、镁、铝, 极度富钠贫钾, 富集 Hf、Zr、Nb、Y 等高场强元素, 亏损 Rb、K、Ba 等大离子亲石元素, 具有较高的  $(K_2O + Na_2O)/Al_2O_3$ 、 $FeO^T/MgO$ 、Ga/Al 比值, 负的 Eu 异常, 稀土元素配分曲线呈右倾海鸥型配分模式。锆石饱和温度介于 857~884°C 之间, 同时具有非常低 Sr 高 Yb 特征, 指示岩石形成于低压高温的伸展构造背景。锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$  值为  $-0.96 \sim +4.58$ , 二阶段模式年龄  $t_{DM2} = 2476 \sim 2821$  Ma, 明显大于花岗岩的成岩时代, 结合岩石地球化学特征指示黑沟碱长花岗岩岩浆源于太古宙 TTG 片麻岩在地壳浅部伸展条件下的部分熔融。综合区域已有的岩石学、地球化学和同位素特征等资料, 辽吉地区在古元古代早期可能处于大陆弧后盆地构造环境, 黑沟碱长花岗岩是弧后盆地伸展环境下的产物。

**关键词:** 古元古代; 辽吉造山带; Hf 同位素; A 型花岗岩; 弧后盆地

华北克拉通作为我国面积最大和最古老的克拉通, 其形成和演化一直是国内外前寒武纪研究的热点 (Zhang Qiusheng, 1988; Chen Rongdu, 1984; Bai Jin et al., 1993; Li Sanzhong et al., 2001, 2003; Zhao G C et al., 2005, 2012; Zhai M G et al., 2007, 2011)。华北克拉通被划分为东部陆块、西部陆块和中间的碰撞带 (Zhao G C et al., 2012), 辽吉造山带位于东部陆块, 南北两侧分别是太古代狼林陆块和龙岗陆块 (Zhai Mingguo et al., 2007)。对于辽吉造山带形成的构造背景及演化过程一直存在裂谷模式 (Zhang Qiusheng, 1988; Chen Rongdu, 1984; Hao Defeng et al., 2004; Li S Z et al., 2005, 2006) 和弧-陆、陆-陆碰撞造山带模式 (Bai Jin et al., 1993; He Gaopin et al., 1998; Lu Xiaoping et

al., 2004b, 2005; Wang Huichu et al., 2011; Li Zhuang et al., 2015) 之争。虽然辽吉造山带在形成构造背景方面存在争议, 但绝大多数学者认可带内 ~1.93Ga 南、北陆块拼合发生变质作用 (Liu Fulai et al., 2015), 并伴随着古元古代岩浆活动, 也就是说辽吉造山带具备造山带应有的岩浆作用、变质作用和强烈的构造变形作用。

不同学者对辽吉造山带内的古元古代花岗岩进行了大量研究工作, 取得了一系列重要进展, 其中之一便是在该带内识别出两期重要岩浆活动, 分别为 2.1~2.2Ga 侵位的条痕状花岗岩 (Lu Xiaoping et al., 2004a, 2004b; Yang Mingchun et al., 2015; Wang Xiangjian et al., 2017; Ren Yunwei et al., 2017); 1.85~1.88Ga 侵位的造山后或非造山斑状

注: 本文为中国地质调查局地质调查项目“辽宁 1:5 万响水河子等两幅区域地质调查(编号 DD20160049-9)”资助的成果。

收稿日期: 2019-07-21; 改回日期: 2019-09-21; 网络发表日期: 2019-11-26; 责任编辑: 张招崇; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 杨玉伟, 女, 1987 年生。工程师, 固体矿产勘查专业。Email: 478033166@qq.com。通讯作者: 余超, 男, 1987 年生。工程师, 地质学专业。Email: 286149526@qq.com。

**引用本文:** 杨玉伟, 余超, 王广伟, 苏特, 杨新宇, 张天元. 2020. 辽东黑沟地区古元古代碱长花岗岩年代学、地球化学、Hf 同位素特征及其对辽吉造山带构造演化的制约. 地质学报, 94(8): 2212~2226, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020020.  
Yang Yuwei, Yu Chao, Wang Guangwei, Su Te, Yang Xinyu, Zhang Tianyuan. 2020. Chronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Paleoproterozoic alkali feldspar granite from the Heigou area in the eastern Liaoning Province: constraints on the tectonic evolution of the Liao-Ji orogenic belt. Acta Geologica Sinica, 94(8): 2212~2226.

花岗岩和碱性正长岩(Hao Defeng et al., 2004; Yang Jinhui et al., 2007)。对于前者又称辽吉花岗岩(Zhang Qiusheng, 1988),但关于该花岗岩的来源、成因类型、构造背景等一系列问题,多年来一直存在激烈的争论。早期辽吉花岗岩被作为地层或是变质交代成因的混合岩处理,原岩为沉积岩,为重熔型的 S 型花岗岩(Qu Hongxiang et al., 2000)。同时部分学者认为该花岗岩为 A 型花岗岩,来源于太古宙地壳的部分熔融(Hao Defeng et al., 2004; Li Chao et al., 2017),也有该花岗岩属 I 型花岗岩,形成于下地壳来源的酸性岩浆和富集地幔来源的基性岩浆的混合的报道(Yang Mingchun et al., 2015)。辽吉花岗岩在构造背景方面则主要存在裂谷环境和弧后盆地的激烈争论。通过对上述争论进行分析可以看出问题的关键在于对辽吉花岗岩源岩及成因类型上认识的不足带来对构造环境认识上的偏差从而产生了争议,同时导致研究者对本区古元古代构造演化在认识上的差异。本次工作在辽东黑沟地区识别出一套古元古代钠质辽吉花岗岩,其成因与弧后盆地伸展作用下新太古代基底的部分熔融有关,显示出与同期钾质辽吉花岗岩有诸多差异。以上研究

显示辽吉花岗岩可能由不同成因类型、形成于不同构造背景的花岗质岩石组成。鉴于此本文对黑沟碱长花岗岩进行同位素年代学、地球化学、成因学及形成构造背景等方面的研究,以期为探讨辽吉造山带早期构造属性提供新的研究依据。

### 1 区域地质背景及岩相学特征

研究区位于华北克拉通北缘东段,处于辽吉古元古代造山带北缘,地理位置位于辽宁省东部桓仁县黑沟乡(图 1)。区内主要发育的地质体为下元古界辽河岩群、古元古代花岗岩、白垩系下统小岭组以及第四系。前人以盖县-析木城-塔子岭-苴草甸子-绥阳-线为界将辽吉古元古代活动带内广泛出露的变沉积-火山岩系划分为北部亚带和南部亚带,前者包括北辽河岩群、老岭岩群,后者包括南辽河岩群、集安岩群。研究区内的辽河岩群属于前人划分的北部亚带北辽河岩群,自下而上划分为里尔峪岩组、高家峪岩组、大石桥岩组和盖县岩组。研究区北部小洞子-双岭子一带发育多条东北向具有逆冲性质的逆断裂,这些断裂切割辽河岩群,并控制了辽河岩群现今的构造格局。区内出露的花岗岩主要为古元

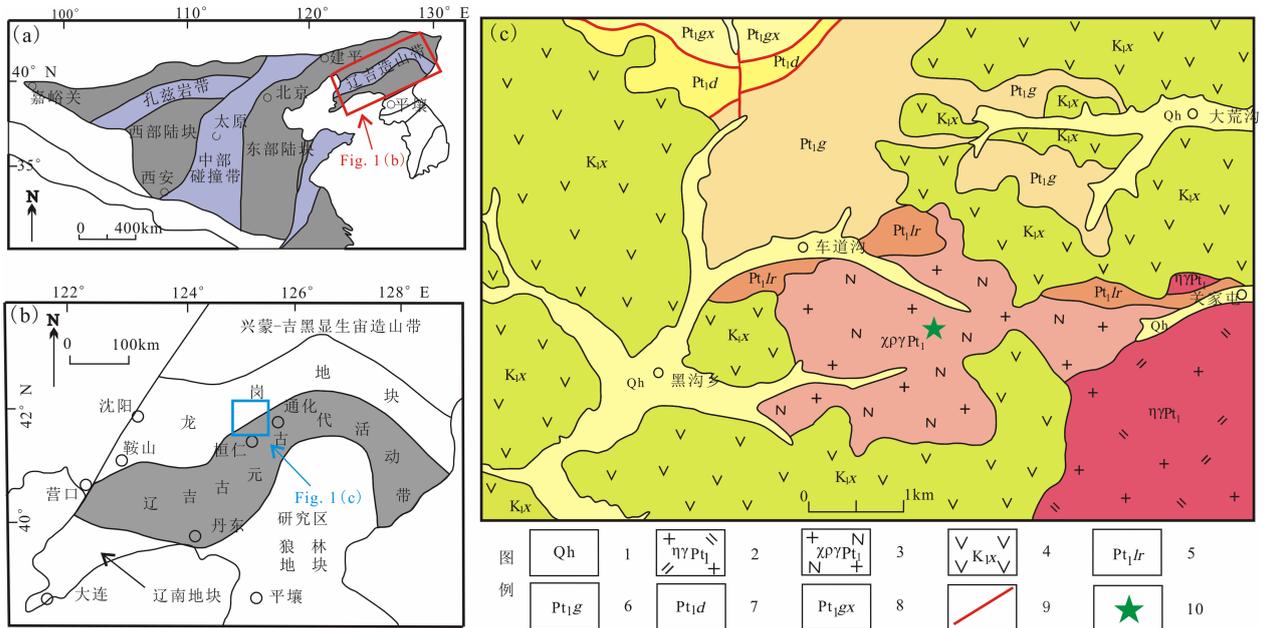


图 1 辽东黑沟地区地质略图(a,据 Zhao et al., 2005;b,据 Li et al., 2005)

Fig. 1 Simplified geological map of the Heigou area, Liaoning Province

(a, after Zhao et al., 2005; b, after Li et al., 2005)

- 1—第四系; 2—古元古代二长花岗岩; 3—古元古代碱长花岗岩; 4—小岭组; 5—里尔峪岩组; 6—高家峪岩组;
- 7—大石桥岩组; 8—盖县岩组; 9—断层; 10—采样点

- 1—Quaternary; 2—Paleoproterozoic monzogranitic; 3—Paleoproterozoic alkali feldspar granite; 4—Xiaoling Formation; 5—Lieryu Formation;
- 6—Gaojiayu Formation; 7—Dashiqiao Formation; 8—Gaixian Formation; 9—fault; 10—sample locations

古代窄沟二长花岗岩和黑沟碱长花岗岩,两者同属辽吉花岗岩,本次工作以后者为研究对象。黑沟碱长花岗岩岩体呈岩株状产出,地表形态不规则,总体呈北西向展布,出露面积约14km<sup>2</sup>。岩体西侧和南侧被中生代火山岩和第四系掩盖,北侧由于覆盖严重与辽河岩群接触关系不清,东侧被窄沟二长花岗岩侵入。黑沟岩体普遍发育平行于辽河岩群层理的条痕状构造,岩体内部存在少量的斜长角闪岩包体,并发育有晚期的变质基性脉岩。

本次工作中在黑沟乡以东车道沟附近对黑沟岩体采集了同位素和地球化学样品,采样位置见图1c,岩石样品均为野外采集的新鲜岩石。碱长花岗岩样品野外风化面成黄褐色,新鲜面呈浅肉红色,花岗结构,条痕状构造(图2a,b)。岩石主要矿物为石英(25%~30%)和斜长石(65%~70%),几乎不含钾长石,部分标本可见少量的角闪石,含量低1%。其中石英它形粒状,粒径1~3mm,大都呈集合体排布,有的被拉长形成断续的条带;斜长石呈半自形板状,属钠长石( $An=0.20\sim 0.89$ ),发育聚片双晶,受应力作用,双晶纹弯曲,粒径1~3mm,部分绢云母化、黝帘石化(图2c,d)。

## 2 样品分析方法

本次样品的主微量元素分析测试由国土资源部沈阳矿产资源监督检测中心完成。主量元素使用X射线荧光光谱仪(XRF-1500)完成分析测试,其中FeO含量通过湿化学方法测定。微量元素、稀土元素分析使用等离子体质谱仪(ICP-MS)Element II测试完成,当元素质量分数大于 $10\times 10^{-6}$ 的误差小于5%,小于 $10\times 10^{-6}$ 的误差小于10%。

锆石挑选、制靶及阴极发光(CL)图像均在河北省区域地质调查研究院地质实验室完成。经过双目镜下仔细挑选表面平整光洁、晶型和透明度较好的锆石颗粒,然后将它们粘贴在环氧树脂表面,待环氧树脂固化之后对其表面抛光至锆石中心。抛光后将锆石进行透射光、反射光和阴极发光显微照相,通过反射光和CL图像详细研究锆石的晶体形貌和内部结构特征,以选择同位素分析的最佳点。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 原位定年和 Lu-Hf 同位素均在北京燕都中实测试中心完成。锆石 U-Pb 原位定年激光剥蚀系统为 GeoLas Pro, ICP MS 为 Agilent 7500, 激光剥蚀直径为 30 $\mu\text{m}$ 。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量,及 U-Th-Pb 同位素比值

和年龄计算)采用软件 ICPMS Data Cal 完成。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot 程序进行处理。锆石原位 Lu-Hf 同位素测年由美国热电 Neptune-plus MC-ICP-MS 与 NewWave UP213 激光烧蚀进样系统完成测试,具体测试步骤与校准方法详见 Wu Fuyuan et al. (2007a)。锆石剥蚀使用频率 8Hz, 能量为 16J/cm<sup>2</sup> 的激光剥蚀 31s, 剥蚀出直径约 30 $\mu\text{m}$  的剥蚀坑。测试时每个测试点的 <sup>173</sup>Yb/<sup>172</sup>Yb 平均值用于计算 Yb 的分馏系数,然后再扣除 <sup>176</sup>Yb 对 <sup>176</sup>Hf 的同质异位素干扰。<sup>173</sup>Yb/<sup>172</sup>Yb 的同位素比值为 1.35274。分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、同位素质量分馏校正)采用软件 ICPMS Data Cal 完成。

## 3 分析结果

### 3.1 锆石 U-Pb 年龄

样品采自黑沟乡以东车道沟附近(地理坐标: 41°22'50"N; 125°24'50"E), 岩石风化面呈浅肉红色, 发育条痕状构造。锆石多浅紫色, 金刚光泽, 透明一半透明, 个别半透明-不透明, 表面多具裂纹或铁染斑点, 晶体多为不规则粒状, 少数为长柱状, 锆石长约 50~120 $\mu\text{m}$ , 长宽比 1.5~3.5。阴极发光图像中锆石具有较典型的岩浆振荡环带结构(生长环带)(图3), 锆石  $U=89\times 10^{-6}\sim 683\times 10^{-6}$ ,  $Th=42\times 10^{-6}\sim 572\times 10^{-6}$ ,  $Th/U=0.22\sim 0.88$ (表1),  $Th/U$  均大于 0.2, 结合锆石发育明显的岩浆振荡环带可判断为岩浆锆石(Belousova et al., 2002)。29 粒锆石测试结果均落在谐和线及其附近(图4a), 给出的 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 加权平均年龄为 2186.5 $\pm$ 6.5Ma(图4b), 可以代表碱长花岗岩的成岩年龄。

### 3.2 锆石 Hf 同位素组成

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析部位紧邻锆石 U-Pb 分析点位置, 分析结果见表2。所有分析点的 <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 比值均低于 0.002, 表明绝大多数锆石形成后的放射性成因 Hf 积累十分有限, 因而测定的 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 比值应能较好地反映其形成过程中 Hf 同位素的组成特征(Wu Fuyuan et al., 2007a)。黑沟碱长花岗岩 14 个测试点的 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf = 0.281380~0.281625, 由岩石成岩年龄(Age = 2186Ma)计算得到初始 Hf 同位素成分  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  介于 -0.99~+4.58, 从表2中可以看出,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  可分为两组, 前者具有明显负值  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -0.96\sim -0.99$ ,

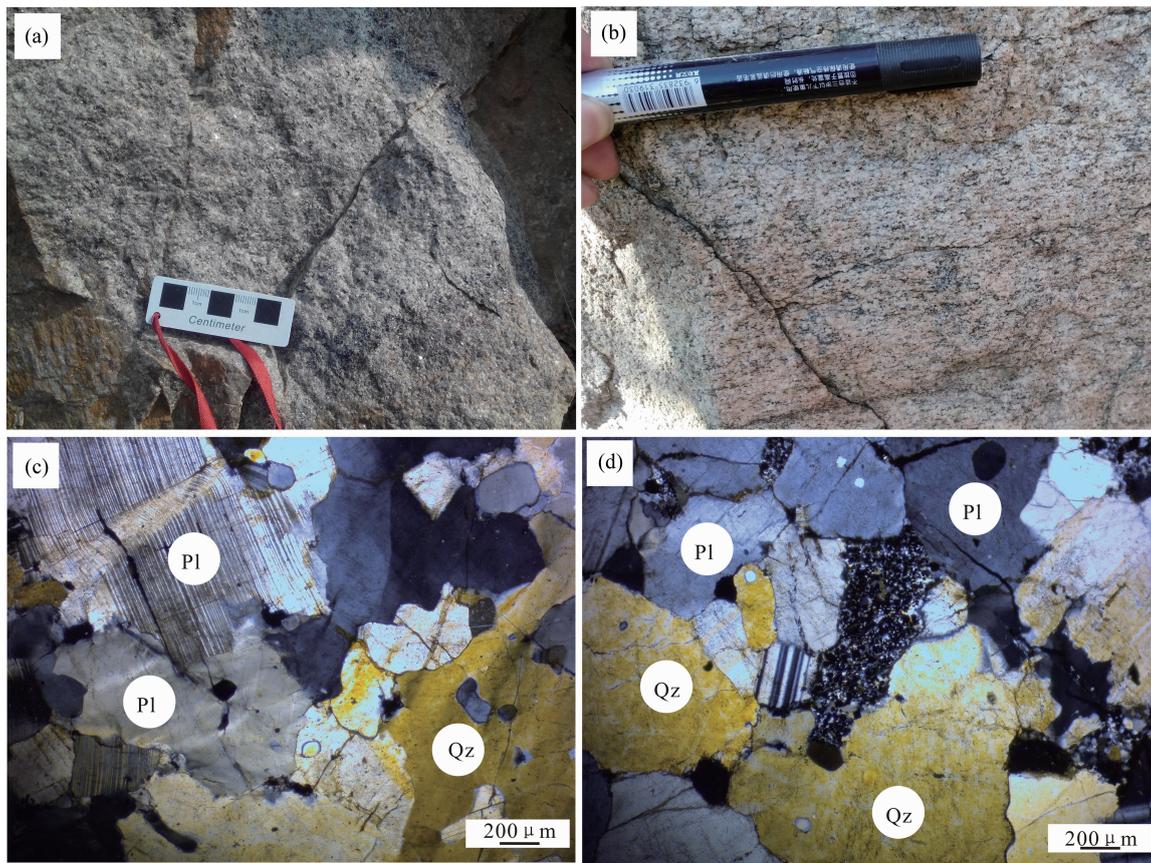


图 2 辽宁黑沟地区碱长花岗岩岩相学特征

Fig. 2 Petrographic characteristics of alkali feldspar granite in Heigou area, Liaoning Province

(a) 碱长花岗岩组构特征; (b) 碱长花岗岩野外呈明显条痕状构造; (c) 碱长花岗岩的矿物特征(正交偏光)(斜长石发育聚片双晶, 受应力作用双晶纹发生弯曲, 石英溶蚀长石形成港湾状); (d) 碱长花岗岩的矿物特征(正交偏光); Qz—石英; Pl—斜长石  
 (a)—Fabric characteristics of the alkali feldspar granite; (b)—alkali feldspar granite has obvious striac structure; (c)—mineral characteristics of the alkali feldspar granite (perpendicular polarized) (the plagioclase develops an albite twin, which is bent by stress, and the quartz partly dissolve feldspar to form a harbor structure); (d)—mineral characteristics of the alkali feldspar granite (perpendicular polarized); Qz—quartz; Pl—plagioclase

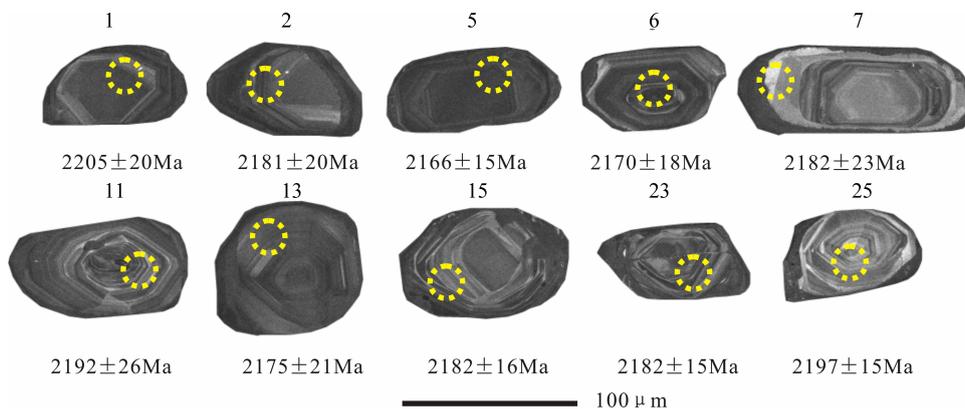


图 3 辽宁黑沟地区碱长花岗岩锆石阴极发光图像和分析点位置图

Fig. 3 CL images and analyses of zircons from the alkali feldspar granite in Heigou area, Liaoning Province

对应的二阶段模式年龄为  $t_{DM_2} = 2817 \sim 2821 \text{ Ma}$ , 后者具有正值  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = +4.58 \sim 0$ , 对应的二阶段模式年龄  $t_{DM_2} = 2476 \sim 2763 \text{ Ma}$ 。

### 3.3 地球化学特征

黑沟碱长花岗岩主微量元素分析结果见表 3。黑沟碱长花岗岩具有高硅 ( $\text{SiO}_2 = 74.26\% \sim$

表1 辽宁黑沟地区碱长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 数据表

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of alkali feldspar granite in Heigou area, Liaoning Province

测点	U	Th	Th/U	同位素比值						年龄结果(Ma)							
	$\times 10^{-6}$			$^{207}\text{Pb}/$	$^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/$	$^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/$	$^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/$	$^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/$	$^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/$	$^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/$	$^{238}\text{U}$
				$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$
TW-1	449	294	0.65	0.1383	0.0016	7.5419	0.1256	0.3971	0.0055	2205	21	2178	15	2156	25		
TW-2	334	240	0.72	0.1363	0.0016	7.6065	0.0734	0.4029	0.0038	2181	20	2186	9	2182	17		
TW-3	110	46	0.42	0.1360	0.0017	7.6730	0.0821	0.4074	0.0044	2177	21	2193	10	2203	20		
TW-4	334	268	0.80	0.1375	0.0011	7.6168	0.1254	0.4049	0.0065	2196	14	2187	15	2191	30		
TW-5	683	572	0.84	0.1351	0.0012	7.7127	0.0861	0.4155	0.0053	2166	15	2198	10	2240	24		
TW-6	483	353	0.73	0.1355	0.0014	7.6782	0.1173	0.4097	0.0051	2170	18	2194	14	2214	23		
TW-7	250	121	0.49	0.1364	0.0018	7.6142	0.1098	0.4074	0.0057	2182	23	2187	13	2203	26		
TW-8	173	85	0.49	0.1363	0.0015	7.6566	0.0961	0.4072	0.0039	2180	19	2192	11	2202	18		
TW-9	137	70	0.51	0.1375	0.0013	7.5841	0.0979	0.4002	0.0043	2197	17	2183	12	2170	20		
TW-10	255	143	0.56	0.1371	0.0016	7.4628	0.0831	0.3938	0.0036	2191	21	2169	10	2140	17		
TW-11	165	109	0.66	0.1372	0.0020	7.5851	0.0927	0.4026	0.0066	2192	26	2183	11	2181	30		
TW-12	293	237	0.81	0.1363	0.0013	7.6890	0.0660	0.4087	0.0027	2180	16	2195	8	2209	12		
TW-13	424	234	0.55	0.1358	0.0016	7.5902	0.1620	0.4056	0.0069	2175	21	2184	19	2195	32		
TW-14	278	186	0.67	0.1364	0.0019	7.5671	0.1448	0.4019	0.0067	2182	24	2181	17	2178	31		
TW-15	299	221	0.74	0.1364	0.0013	7.5885	0.0887	0.4029	0.0039	2182	16	2184	10	2182	18		
TW-16	189	79	0.42	0.1373	0.0013	7.5549	0.0655	0.3987	0.0027	2194	16	2180	8	2163	12		
TW-17	89	42	0.47	0.1375	0.0021	7.3249	0.1726	0.3843	0.0064	2196	26	2152	21	2096	30		
TW-18	567	125	0.22	0.1355	0.0010	7.5598	0.1089	0.4048	0.0042	2170	13	2180	13	2191	19		
TW-19	555	489	0.88	0.1372	0.0012	7.5369	0.0696	0.3977	0.0028	2192	15	2177	8	2158	13		
TW-20	261	154	0.59	0.1365	0.0011	7.7237	0.0745	0.4102	0.0028	2183	14	2199	9	2216	13		
TW-21	405	292	0.72	0.1379	0.0011	7.5042	0.0746	0.3937	0.0032	2201	14	2173	9	2140	15		
TW-22	289	71	0.25	0.1370	0.0022	7.4962	0.1597	0.3958	0.0073	2189	28	2173	19	2150	34		
TW-23	308	188	0.61	0.1364	0.0012	7.6964	0.0620	0.4089	0.0026	2182	15	2196	7	2210	12		
TW-24	218	107	0.49	0.1364	0.0011	7.6317	0.1470	0.4042	0.0064	2182	14	2189	17	2188	29		
TW-25	232	148	0.64	0.1375	0.0012	7.5580	0.0863	0.3975	0.0031	2197	15	2180	10	2157	14		
TW-26	106	53	0.50	0.1379	0.0018	7.6276	0.0939	0.4010	0.0033	2201	23	2188	11	2174	15		
TW-27	141	123	0.88	0.1390	0.0018	7.5663	0.0831	0.3948	0.0028	2215	23	2181	10	2145	13		
TW-28	285	150	0.52	0.1379	0.0019	7.6191	0.1297	0.4005	0.0060	2201	24	2187	15	2172	27		
TW-29	95	54	0.56	0.1363	0.0016	7.6388	0.1118	0.4057	0.0040	2180	21	2189	13	2195	18		

注:测试单位北京燕都中实测试中心。

表2 辽宁黑沟地区碱长花岗岩锆石 Hf 同位素组成

Table 2 Hf isotope composition of zircons of alkali feldspar granite in Heigou area, Liaoning Province

测号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	年龄(Ma)	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM}_1}$ (Ma)	$t_{\text{DM}_2}$ (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
Hf-01	0.020183	0.000718	0.281392	0.000019	2186	-48.8	-0.96	2578	2817	-0.98
Hf-02	0.033472	0.001218	0.281461	0.000024		-46.37	0.75	2517	2712	-0.96
Hf-03	0.015270	0.000558	0.281540	0.000022		-43.56	4.55	2367	2479	-0.98
Hf-04	0.037264	0.001263	0.281450	0.000028		-46.76	0.28	2535	2740	-0.96
Hf-05	0.023261	0.000805	0.281465	0.000018		-46.21	1.53	2484	2665	-0.98
Hf-06	0.022401	0.000794	0.281462	0.000018		-46.32	1.42	2487	2670	-0.98
Hf-07	0.022701	0.000759	0.281468	0.000023		-46.11	1.71	2477	2654	-0.98
Hf-08	0.009107	0.000312	0.281531	0.000028		-43.87	4.58	2364	2476	-0.99
Hf-09	0.036626	0.001261	0.281488	0.000022		-45.41	1.67	2483	2657	-0.96
Hf-10	0.036248	0.001216	0.281438	0.000024		-47.18	-0.07	2549	2763	-0.96
Hf-11	0.040645	0.001342	0.281513	0.000023		-44.53	2.42	2454	2610	-0.96
Hf-12	0.013147	0.000472	0.281380	0.000025		-49.22	-0.99	2578	2821	-0.99
Hf-13	0.025214	0.000873	0.281444	0.000024		-46.98	0.64	2518	2718	-0.97
Hf-14	0.015490	0.000581	0.281465	0.000021		-46.22	1.85	2470	2645	-0.98

注:测试单位北京燕都中实测试中心。

74.94%, 平均 74.68%), 富碱 ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 0.16\% \sim 0.30\%$ , 平均 0.24%), 低铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 7.34\% \sim 7.48\%$ , 平均 7.42%), 贫钙 ( $\text{Ca}_2\text{O} = 13.04\% \sim 13.53\%$ , 平均 13.34%) 特征。岩石极度

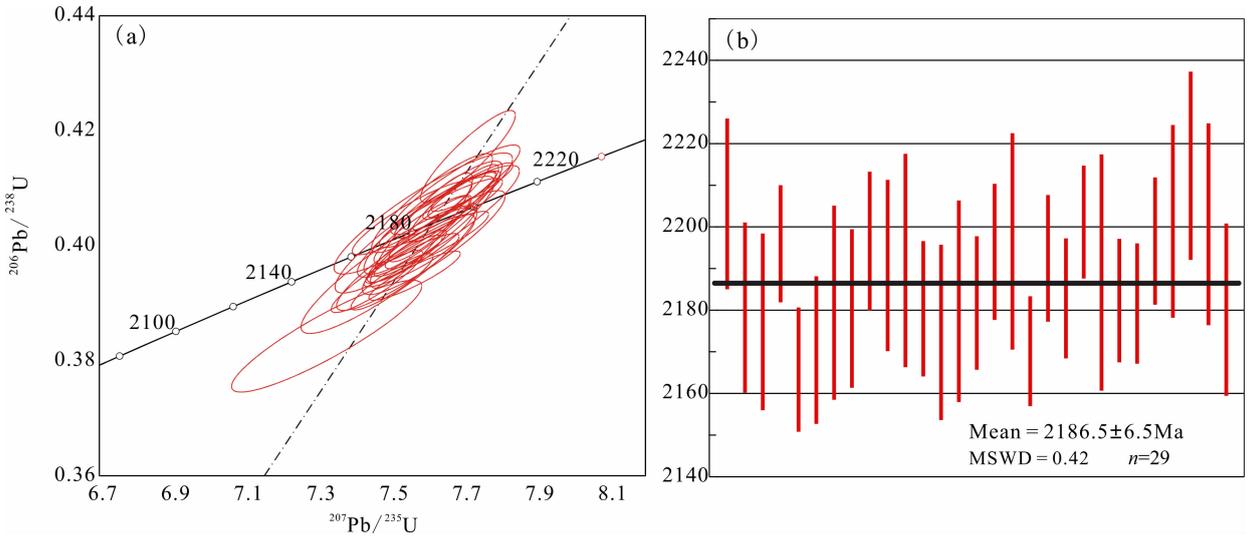


图 4 辽东黑沟地区碱长花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和加权平均年龄(b)  
Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and weighted mean age (b)  
of alkali feldspar granite in Heigou area, Liaoning Province

表 3 辽东黑沟地区碱长花岗岩的主量元素(%)和微量元素( $\times 10^{-6}$ )分析结果

Table 3 Major (%) and trace ( $\times 10^{-6}$ ) element data of alkali feldspar granite in Heigou area, Liaoning Province

样品号	PM11-2	PM13-2	PM13-4	PM13-5	PM13-6	PM13-7	样品号	PM11-2	PM13-2	PM13-4	PM13-5	PM13-6	PM13-7
SiO <sub>2</sub>	74.26	74.72	74.67	74.94	74.67	74.82	Tb	1.82	1.72	1.58	1.52	1.36	1.23
TiO <sub>2</sub>	0.28	0.3	0.3	0.28	0.3	0.27	Dy	9.10	9.33	9.73	8.76	7.87	7.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.4	13.04	13.32	13.53	13.32	13.42	Ho	1.88	1.81	1.94	1.68	1.38	1.22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.36	2.48	2.6	2.46	2.97	2.71	Er	6.10	5.69	5.89	5.47	5.12	5.19
FeO	0.19	0.64	0.48	0.26	0.16	0.1	Tm	0.98	0.97	1.03	0.97	0.85	0.92
MnO	0.027	0.02	0.01	0.033	0.01	0.01	Yb	5.61	5.59	5.93	5.54	5.12	5.06
MgO	0.05	0.16	0.12	0.15	0.08	0.07	Lu	0.78	0.77	0.74	0.77	0.62	0.67
CaO	0.26	0.3	0.3	0.16	0.21	0.2	Y	42.30	51.70	57.10	46.60	43.20	45.60
Na <sub>2</sub> O	7.27	7.35	7.22	7.33	7.32	7.2	ΣREE	215.7	213.2	208.9	165.2	148.3	144.6
K <sub>2</sub> O	0.13	0.1	0.12	0.14	0.16	0.17	(La/Yb) <sub>N</sub>	5.00	4.34	3.25	3.22	3.26	3.22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	δEu	0.54	0.64	0.55	0.35	0.49	0.32
Mg <sup>#</sup>	2.70	9.03	7.05	9.76	4.79	4.69	Nb	23.3	20.7	22.3	22.5	19.6	18
A/NK	1.11	1.07	1.11	1.11	1.09	1.10	Ga	24.6	23.2	22.8	24.7	24.3	22.2
A/CNK	1.07	1.02	1.06	1.08	1.06	1.07	Zr	371	406	365	355	352	365
σ43	1.75	1.74	1.7	1.74	1.76	1.7	Th	22	13.4	15.6	27.1	21.3	15.4
AR	3.36	3.53	3.34	3.40	3.47	3.44	Sr	34.8	19.8	24.3	32.9	17.2	18.1
An	0.86	0.87	0.98	0.30	0.29	0.69	Ba	30.6	29	30.6	27.55	19.6	31.1
Ab	61.97	62.54	61.46	62.32	62.34	61.65	V	7.09	2.81	3.59	5.4	3.47	4.18
Or	0.77	0.60	0.72	0.83	0.95	1.02	Co	1.37	0.46	0.36	1.07	0.62	0.48
La	39.10	33.80	26.90	24.87	23.30	22.70	Cr	7.97	5.34	6.17	6.44	4.32	4.94
Ce	83.50	81.30	82.30	60.90	54.30	52.80	Ni	4.34	1.01	0.89	1.23	1.74	1.19
Pr	10.40	11.20	10.80	8.19	7.23	7.65	Rb	5.9	4.13	3.78	6.73	7.58	4.39
Nd	39.00	43.60	43.90	33.10	28.70	27.40	Ta	1.46	2	1.77	1.66	1.95	1.7
Sm	8.58	8.50	9.05	6.26	5.72	6.01	U	1.96	1.83	1.69	1.53	2.47	1.91
Eu	1.22	1.35	1.34	0.75	0.64	0.56	Hf	10.6	11.5	10.3	10.3	10.6	10.8
Gd	7.69	7.58	7.84	6.51	6.14	5.92	T <sub>Zr</sub> (°C)	857	882	884	880	878	878

注:测试单位国土资源部沈阳矿产资源监督检测中心。

富钠贫钾(Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O=42.35~73.5,平均 55.0),属钠质花岗岩。在 SiO<sub>2</sub>-(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)图解中(图 5a)样品落入花岗岩区域内,在标准矿物 An-Ab-Or 分类图解中(图 5b),样品均落入奥长花岗岩区域,

与岩相学特征一致。在 SiO<sub>2</sub>-AR 图解中(图 6a)落入碱性系列范围内(AR=3.34~3.53),属碱性系列岩石,在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解中(图 6b),样品投在低钾(拉斑)系列区域,在 A/NK-A/CNK 图解中样品落

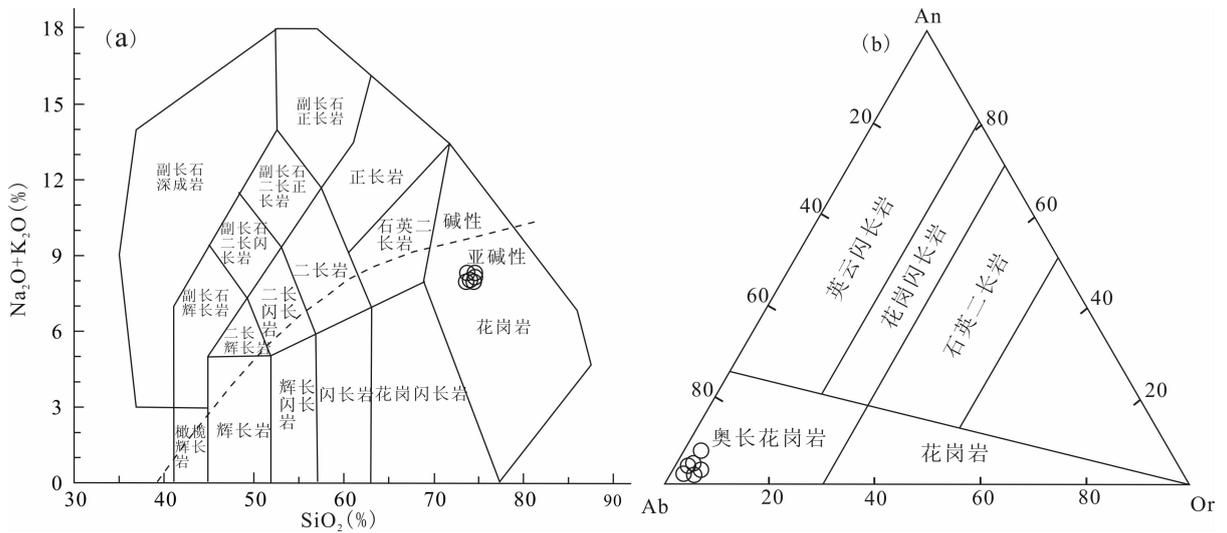


图5 辽宁黑沟地区碱长花岗岩 TAS图解(a)(据 Middlemost,1994)和 An-Ab-Or 分类图解(b)(据 O'Connor,1965)  
Fig. 5 TAS diagram (a) (after Middlemost,1994) and An-Ab-Or diagram (b) (after O'Connor,1965)

of alkali feldspar granite in Heigou area, Liaoning Province

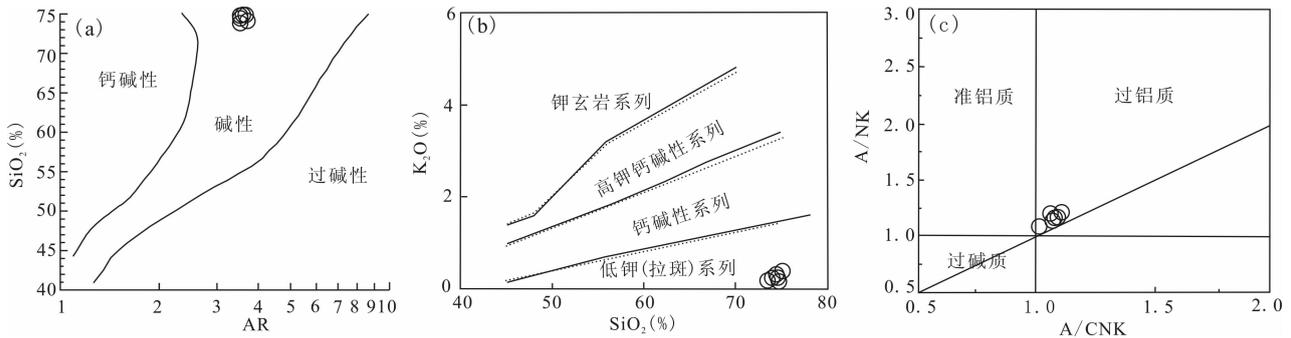


图6 辽宁黑沟地区碱长花岗岩  $\text{SiO}_2$ -AR图解(a)(据 Wright,1969)和  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$   
(b)(据 Peccerillo et al., 1976), A/CNK-A/NK图解(c)(据 Frost et al., 2001)

Fig. 6  $\text{SiO}_2$ -AR diagram (a) (after Wright,1969) and  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  diagram (b) (after Peccerillo et al., 1976),  
A/CNK-A/NK diagram (c) (after Frost et al., 2001) of alkali feldspar granite in Heigou area, Liaoning Province

入弱过铝质区域(图6c)。黑沟碱长花岗岩稀土总量  $\Sigma\text{REE} = 144.66 \sim 215.76$ , 平均值 182.71,  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 3.22 \sim 4.34$ , 轻重稀土分馏较为明显。在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线模式图上(图7a), 轻稀土相对重稀土轻微富集, 轻稀土配分曲线向右倾斜, 重稀土配分曲线平坦, 具有明显的铕负异常( $\delta\text{Eu} = 0.32 \sim 0.64$ )。黑沟岩体具有极低的 Sr 含量( $17.2 \times 10^{-6} \sim 34.8 \times 10^{-6}$ )和低 Ba、Cr、Ni 含量, 显示了高的 Y( $42.3 \times 10^{-6} \sim 57.1 \times 10^{-6}$ )、Yb( $5.06 \times 10^{-6} \sim 5.93 \times 10^{-6}$ )、Zr( $371 \times 10^{-6} \sim 406 \times 10^{-6}$ )含量。在原始地幔标准化蛛网图中(图7b), 岩石富集 Th、U、Zr、Hf, 明显亏损 Rb、K、Ba、Sr、P、Ti, 其他元素相对高出原始地幔数倍不等, 且富集程度近于一致。与辽东其他地区较典型的钾质辽吉花岗岩如: 钱桌沟岩体、鸡冠山岩体、大房身岩体、虎皮

峪岩体、老黑山岩体相比, 黑沟岩体明显富钠贫钾, 轻稀土含量偏低(图7a), 明显亏损 Rb、K、Ba 等大离子亲石元素(图7b)。

## 4 讨论

### 4.1 岩石类型

黑沟碱长花岗岩具有低  $\text{K}_2\text{O}$  ( $0.10\% \sim 0.17\%$ )、Rb( $3.78 \times 10^{-6} \sim 7.58 \times 10^{-6}$ )、Sr( $17.2 \times 10^{-6} \sim 34.8 \times 10^{-6}$ )、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  ( $0.01 \sim 0.02$ )、Rb/Sr ( $0.15 \sim 0.44$ )、高 Y( $45.9 \times 10^{-6} \sim 57.1 \times 10^{-6}$ )、Yb( $5.06 \times 10^{-6} \sim 5.93 \times 10^{-6}$ ), 属低钾(拉斑)系列。花岗岩中暗色矿物仅含有少量角闪石, 排除了岩石属 I、S 型花岗岩(Wu Fuyuan et al., 2007b)。岩石富硅、碱, 贫钙、镁、铝, 具有较高的  $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 、Ga/Al 比值, 富

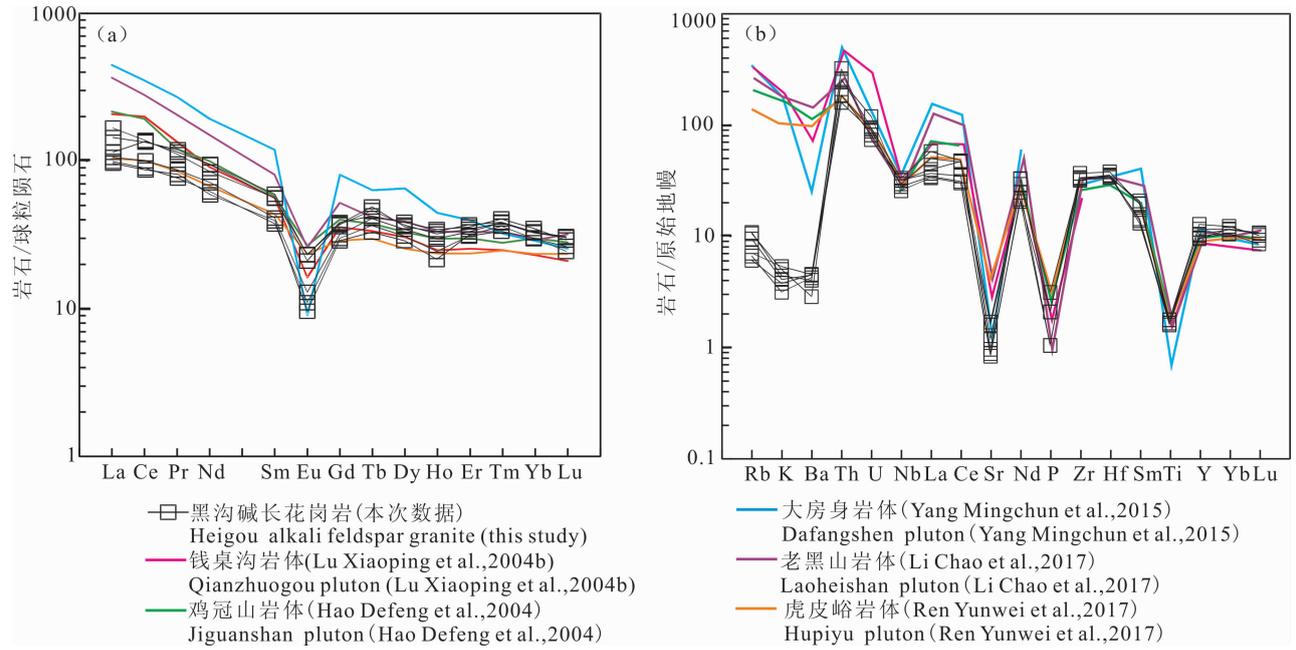


图 7 辽宁黑沟地区碱长花岗岩球粒陨石标准化稀土配分模式图(a)及原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)  
(标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) of alkali feldspar granite in Heigou area, Liaoning Province (normalization values after Sun et al., 1989)

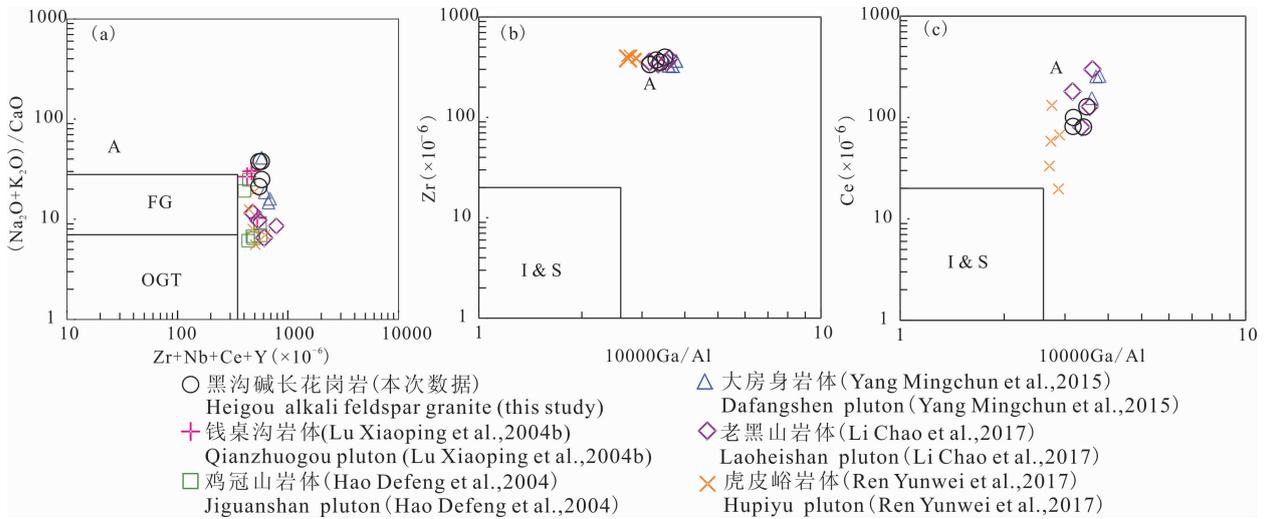


图 8 辽宁黑沟地区碱长花岗岩成因类型判别图解(据 Whalen et al., 1987)

Fig. 8 Genetic type discrimination of alkali feldspar granite in Heigou area, Liaoning Province (after Whalen et al., 1987)

Th、U、Zr、Hf、Ga、Y, 贫 Sr、Ba、Cr、Co、Ni, 轻重稀土分馏明显, 具有明显的 Eu 异常, 稀土元素配分曲线呈右倾海鸥型配分模式, 与 A 型花岗岩地球化学特征表现一致(Loiselle et al., 1979; Collins et al., 1982; Whalen et al., 1987)。在 Whalen et al. (1987) 提出的 A 型花岗岩判别图解中(图 8), 样品均落入了 A 型花岗岩区域内。岩石以含有较高  $\text{Na}_2\text{O}$  (7.20%~7.35%) 和较低的  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.01%~0.03%) 同高分异的 S 型花岗岩 ( $\text{Na}_2\text{O}$  均值

2.81%,  $\text{P}_2\text{O}_5$  均值 0.16) 进行区分。与 I 型花岗岩相比岩石具有较高的 Th ( $13.4 \times 10^{-6} \sim 21.3 \times 10^{-6}$ )、Zr ( $352 \times 10^{-6} \sim 406 \times 10^{-6}$ ) 含量, 同高分异的 I 型花岗岩(形成温度均值 764°C, Sr 均值  $247.00 \times 10^{-6}$ ) (King et al., 1997) 相比岩石具有较高的形成温度(857~884°C), 较低的 Sr 含量(17.2%~24.3%), 同时亏损 Rb、K、Ba 等大离子亲石元素(LILE)。

#### 4.2 岩浆源区及构造环境判别

目前关于 A 型花岗岩成因模式还未形成统一

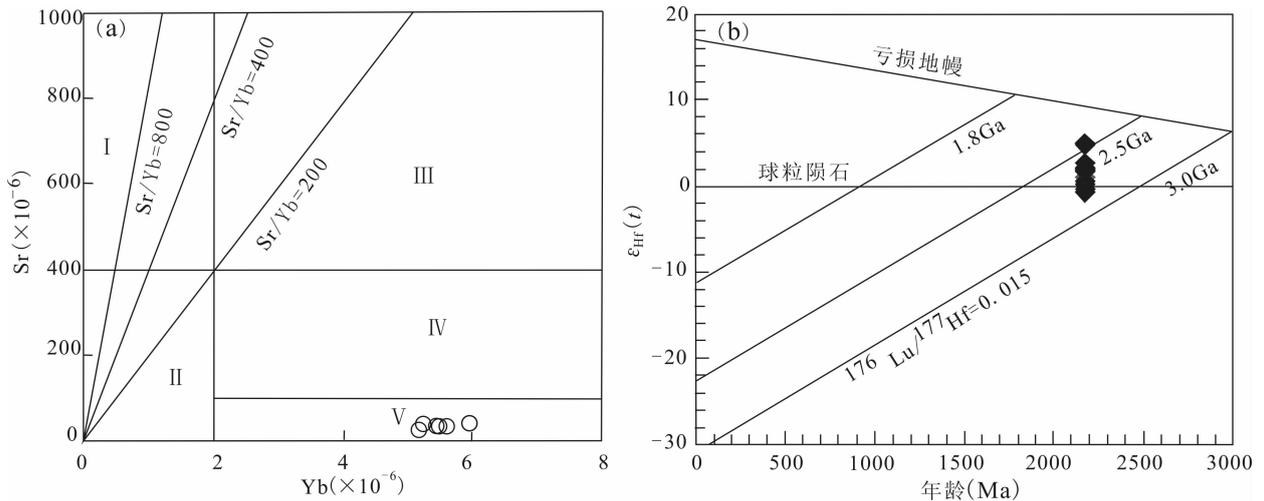


图9 辽宁黑沟地区碱长花岗岩 Sr-Yb 图解(a)(据 Zhang Qi et al., 2006)和 Hf 同位素特征(b)

Fig. 9 Sr-Yb diagram (a) (after Zhang Qi et al., 2006) and Zircon Hf isotopic features (b) of alkali feldspar granite in Heigou area, Liaoning Province

I—高 Sr 低 Yb 型(埃达克型花岗岩); II—低 Sr 低 Yb 型(喜马拉雅型花岗岩); III—高 Sr 高 Yb 型(广西型花岗岩);  
IV—低 Sr 高 Yb 型(浙闽型花岗岩); V—非常低 Sr 高 Yb 型(南岭型花岗岩)

I—High Sr and low Yb type (Adak-type granite); II—low Sr and Low Yb type (Himalaya-type granite); III—high Sr and high Yb Type (Guangxi-type granite); IV—low Sr and high Yb type (Zhemini-type granite); V—very low Sr and high Yb type (Nanling-type granite)

认识, 研究显示 A 型花岗岩的岩浆来源异常丰富, 其中以陆壳重熔和幔源来源为主 (Loiselle et al., 1979; Eby, 1990; Frost et al., 2001; Dall'Agnol et al., 2012)。黑沟碱长花岗岩高  $\text{SiO}_2$ , 低  $\text{MgO}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Co}$ 、 $\text{Ni}$  以及极低  $\text{Mg}^\#$  值 (2.70~9.30) 的地球化学特征, 说明岩浆主要源于地壳物质的部分熔融, 同时岩石具有极低的 Sr 含量及明显 Eu 负异常, 表明它们源区有斜长石的残留, 或源区岩浆经历了斜长石的分离结晶, 壳源花岗岩在形成过程中斜长石通常是重要的残留物之一。在张旗的花岗岩 Sr-Yb 分类图解中(图 9a), 样品落在 V 区属非常低 Sr 高 Yb 的南岭型花岗岩区, 指示其形成压力  $< 0.8 \text{ GPa}$ , 深度小于 30km, 形成的构造背景与减薄地壳有关 (Zhang Qi et al., 2007), 锆石饱和温度计算结果 (Waston et al., 1983) 显示黑沟岩体结晶温度高于  $800^\circ\text{C}$  (表 3), 指示这些花岗岩具有高的岩浆结晶温度, 表明黑沟碱长花岗岩形成于低压高温的伸展构造环境。黑沟碱长花岗岩形成于低压高温的构造环境决定了其不可能通过结晶分异作用而从其他类型花岗岩演化而来, 源区有斜长石的残留, 说明黑沟花岗岩岩浆不可能是由幔源岩浆分异或镁铁质源岩的部分熔融形成。岩石学实验已经证明 A 型花岗岩可能源自英云闪长质-花岗闪长质地壳岩石高温条件下在地壳浅部发生 15%~40% 程度的部分熔融 (King et al., 1997; Popov et al., 2002)。同时 King

et al. (1997) 指出铝质 A 型花岗岩和碱质 A 型花岗岩具有不同的地球化学特征及成因, 前者源于具有正常水含量的长英质地壳的部分熔融, 后者为幔源碱性镁铁质岩浆分离结晶作用形成的产物。

同位素年代学显示华北克拉通东部广泛分布着太古代片麻岩, 主体岩石形成时代为 2500Ma 左右, 锆石 Hf 同位素具有正值与 2500Ma 时亏损地幔的 Hf 同位素相近, 模式年龄显示这些岩石是大约 2600~2800Ma 由亏损地幔分异形成, 说明 2600~2800Ma 为华北克拉通重要的生长时期 (Wu F Y et al., 2005)。黑沟碱长花岗岩中锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于  $-0.99 \sim +4.58$ , 远低于同期亏损地幔值, 所有数据均落在球粒陨石 Hf 同位素演化线及其上、下附近, 位于 2.5Ga 和 3.0Ga 的地壳演化线之内 (图 9b)。岩石单阶段和两阶段模式年龄为 2364~2578Ma 和 2476~2821Ma, 明显大于花岗岩的成岩时代, 与华北克拉通东部新太古代晚期 TTG 质片麻岩具有相似的锆石 Hf 模式年龄。综合岩石的锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素、地球化学特征我们认为黑沟碱长花岗岩的原始岩浆来源于华北克拉通太古宙 TTG 片麻岩在浅部地壳部分熔融。

黑沟碱长花岗岩以其低  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Sr 含量和高的 Y 含量、低 Sr/Y 比值、Th 系列、CA (钙碱性), 亏损 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素显示与同时期钾质辽吉花岗岩具有明显差异。样品在 (Y+Nb)-Rb

图解(图 10a)(Pearce et al., 1984)和 Rb-Hf-Ta 图解(图 10b)(Harris et al., 1986)中落入洋中脊花岗岩区域。需要明确的是黑沟碱长花岗岩虽然落入洋中脊花岗岩区内(图 10),但是与形成于洋中脊环境,属于洋壳本身或是层状的蛇绿岩序列的洋脊花岗岩(Pearce et al., 1984)具有本质区别。黑沟碱长花岗岩来源于长英质地壳的部分熔融,同时辽吉造山带内也未发现典型的蛇绿岩组合,所以该岩石并非传统意义上由地幔玄武质岩浆结晶分异形成的洋脊花岗岩。花岗岩的地球化学特征不仅仅取决于原岩性质,还与岩浆形成的温度、压力有关(Zhang Qi et al., 2006; Wu Fuyuan et al., 2007b),黑沟碱长花岗岩样品落入洋中脊花岗岩区域内显示其与洋脊花岗岩可能具有相似的形成环境。Pearce et al. (1984)将投影在(Y+Nb)-Rb 图解 ORG 区域的花岗岩产出构造环境分为两类,一类是正常的扩张洋中脊与俯冲作用无关,另一类则是俯冲作用诱发的脊,如弧后盆地扩张脊、弧前盆地脊(Barbarin, 1999; Maniar et al., 1989)。碱钙指数(Peacock)(Frost et al., 2001)和(Y+Nb)-Rb 图解的联合使用对于判别(Y+Nb)-Rb 图解中的 ORG 构造环境十分有效,正常的扩张洋中脊为 AC,正常的弧后扩张脊为 CA,弧前扩张脊为 C,同时在(Y+Nb)-Rb 图解上正常的扩张洋中脊和弧后脊者位于 ORG 区,而弧前扩张脊位于 ORG+VAG 区或 VAG 区。黑沟碱长花岗岩样品在 Peacock 的碱钙图解中(图 11a)落入钙碱性区域(CA),在(Y+Nb)-Rb 构造判别图解中(图 10a)落入 ORG 区,具有弧后盆地花岗岩地球化学特征(Hergt et al., 1994; Hawkins, 1995; Bébien et al., 1997),显示黑沟碱长花岗岩的形成与俯冲作用诱发的弧后伸展作用有关。Eby. (1992)提出 A 型花岗岩 A1、A2 两种类型的划分方案,其中 A1 型花岗岩属非造山板内花岗岩,与大陆裂谷环境或地幔热点(地幔羽)有关,A2 型属于后碰撞或后造山环境,包括弧后伸展和造山后伸展,在判别图解中样品落入 A2 区域(图 11b)。考虑到目前辽吉造山带内及整个华北板块还没有明显证据显示 2.2Ga 之前存在古元古代造山作用,黑沟碱长花岗岩的形成应与造山无关,同样显示与弧后伸展作用有关。结合辽吉造山带内岩石地层组合、同位素特征、带内古元古代变质地层具有不同的变质  $P-T$  轨迹以及岩石构造组合的空间分布特征等,我们推测黑沟碱长花岗岩形成于大陆边缘弧后盆地环境,是弧后伸展背景下的产物。

### 4.3 地质意义

2.1~2.2Ga 是辽吉造山带内岩浆活动最为强烈的阶段之一,这期间侵位的辽吉花岗岩多数学者认可铝质“A”型花岗岩,形成于伸展减薄的背景,是辽吉造山带演化早期的产物。对于何种机制引起该地区这一时期的伸展减薄作用还存在大陆裂谷模式和弧后盆地扩张模式之争,争议焦点主要集中在龙岗陆块和辽南陆块、狼林陆块在古元古代之前是否有亲源性、辽吉造山带形成过程中是否有发生俯冲作用、带内发育的双峰式火成岩和 A 型花岗岩等。以往认为辽吉造山带两侧的狼林地块、辽南地块与龙岗地块一样,主要是由新太古代 TTG 岩石组成的古老块体,二者在太古宙时期应归属同一变质基底,这是持裂谷观点的主要证据之一。然而,最新的同位素年龄显示朝鲜境内狼林地块保存了大量的古元古代岩浆、变质事件的记录(Zhao et al., 2006; Zhai et al., 2007; Wu et al., 2007a, 2007b; Wu Fuyuan et al., 2016),仅在临津江一带有确切太古宙基底年龄的报道(Zhao et al., 2006)。辽南太古宙基底仅仅局限于最东南端的金州—庄河一带,以往认为的辽南太古宙基底的分布范围被明显夸大了,许多岩石在野外看上去像是新太古代 TTG 片麻岩,但年代学研究表明它们形成于元古宙甚至显生宙(Lu Xiaoping et al., 2004b)。由此看来辽吉造山带的真实展布范围比现在所认为的要大,狼林地块中分布的狼林群很有可能也是辽吉造山带的一部分。越来越多的证据显示辽吉花岗岩具有钾质和钠质之分,两者在岩石学、地球化学、构造背景等方面存在明显差异。辽吉造山带内广泛发育的钾质 A 型花岗岩属高钾钙碱性系列,与岛弧岩浆岩具有亲缘性,明显不同于裂谷环境下形成的典型 A 型花岗岩,同时带内 2.1~2.2Ga 岩浆活动应是一个连续的弧岩浆序列,并非前人认为的双峰式岩浆岩组合(Chen Bin et al., 2016)。区内钠质的黑沟碱长花岗岩,具有极低 Sr 含量和高的 Y 含量,亏损 Rb、Ba、K 大离子亲石元素,富集 Zr、Hf 高场强元素,具有弧后盆地花岗岩地球化学特征,有别于同期的钾质花岗岩,显示非俯冲成因(图 10),形成于弧后盆地伸展构造环境。岩浆来源于强烈伸展减薄机制下软流圈地幔上涌引起的陆壳物质(TTG)部分熔融,显示辽吉造山带在古元古代中期(2.1~2.2Ga)处于大陆弧后盆地构造环境,辽吉造山带曾经出现过弧-陆碰撞有关的构造演化过程,不支持单一裂谷模式的观点。辽吉造山带的弧后盆地属性也得到了区域内

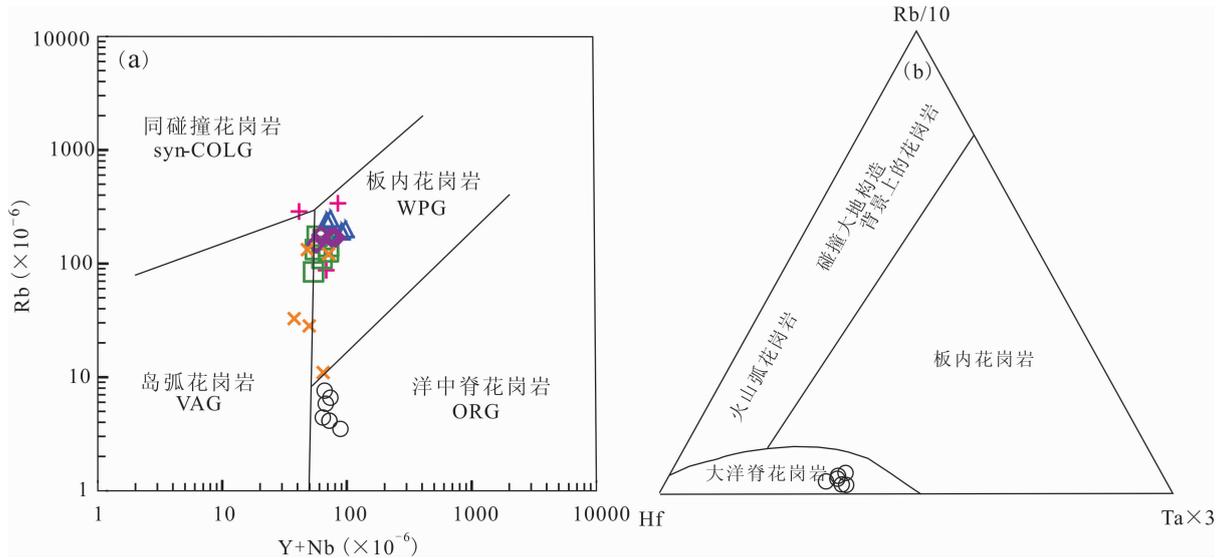


图 10 辽宁黑沟地区碱长花岗岩(Y+Nb)-Rb图解(a)(据 Pearce et al., 1984)和 Rb-Hf-Ta 图解(b)  
(据 Harris et al., 1986), 图例同图 8

Fig. 10 (Y+Nb)-Rb diagram (a) (after Pearce et al., 1984) and Rb-Hf-Ta diagram (b) (after Harris et al., 1986)  
of alkali feldspar granite in Heigou area, Liaoning Province, legend is the same as Fig. 8

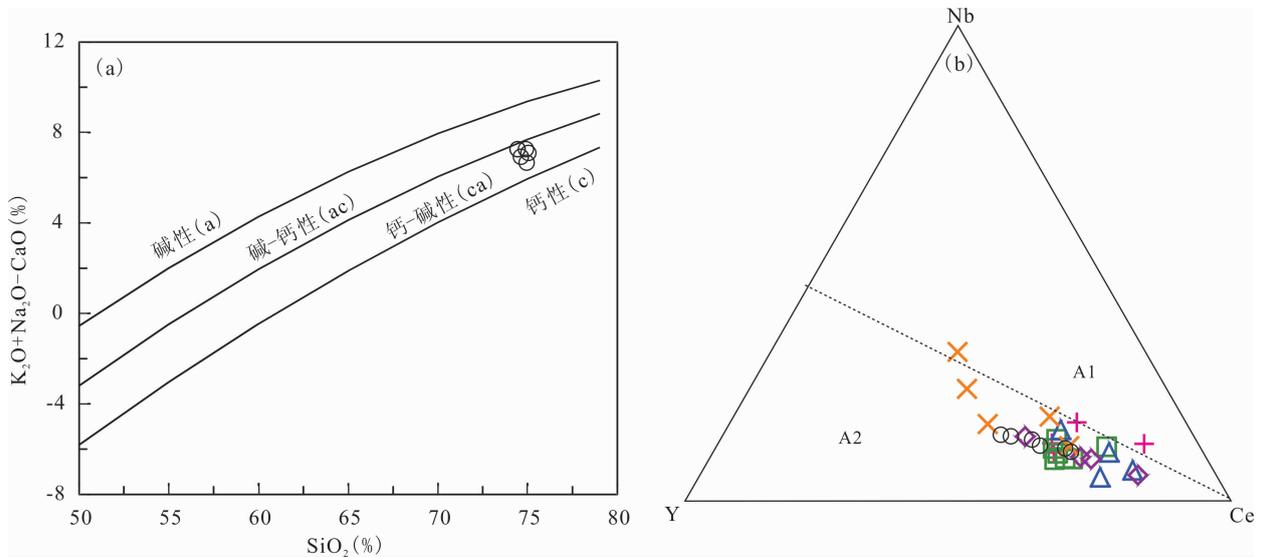


图 11 辽宁黑沟地区碱长花岗岩  $\text{SiO}_2$ -( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ ) 图解(a)

(据 Frost et al., 2001)和 Nb-Y-Ce 分类图(b)(据 Eby, 1992), 图例同图 8

Fig. 11  $\text{SiO}_2$ -( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ ) diagram (a) (after Frost et al., 2001) and Nb-Y-Ce diagram (b)  
of alkali feldspar granite in Heigou area, Liaoning Province (after Eby, 1992), legend is the same as Fig. 8

同期钾质辽吉花岗岩和变质基性岩(包括基性火山岩和侵入岩)相关研究的支持。钾质 A 型辽吉花岗岩富集 Rb、U、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 在(Y+Nb)-Rb 图解中落入火山弧花岗岩和板内花岗岩之间的过渡区域(图 10a), 大部分样品落入了具有岛弧岩浆特征 A2 型花岗岩区内(图 11b), 其 Y 相对于 Nb 更富集, 具有与岛弧玄武岩相似的 Y/Nb 等元素比值, 显

示俯冲成因, 是辽吉古元古代活动带早期活动陆缘弧后盆地扩张阶段的产物(Wang Huichu et al., 2015; Song Yunhong et al., 2016; Wang Xiangjian et al., 2017; Ren Yunwei et al., 2017; Li Chao et al., 2017)。同时期的变质玄武岩(年龄约为 2.2Ga)也具有典型的钙碱性特征, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 岩石形成于岛弧相关环境, 显示俯冲成因, 很可能是弧后盆地的产物(Wang

Huichu et al., 2011; Meng En et al., 2013; Xu Wang et al., 2017)。以往持有弧-陆或陆-陆碰撞论的学者往往强调辽吉造山带地质演化过程中是否存在洋壳,进而寻找标志着消失了的缝合带(Li et al., 2011),而实际情况很可能是古元古代早期发生俯冲的洋壳远在现如今朝鲜半岛东南,并不位于辽吉造山带内,大洋俯冲岩浆弧大致位于朝鲜半岛,即朝鲜岛弧,辽吉带处于朝鲜岛弧(大陆边缘弧)的弧后区域(Peng et al., 2014)。辽吉造山带早期构造演化过程很可能是古元古代早期来自朝鲜半岛东南的大洋岩石圈板块向西北方向俯冲于新太古代变质基底之下,洋壳的持续俯冲与后撤导致弧后不断伸展,进而在大陆岛弧后侧产生 2.1~2.2Ga 期间的辽吉弧后盆地(Li Chao et al., 2017, Chen Bin et al., 2016),在狼林地块临津江地区出露的残余太古宙基底可能是本次构造活动形成的裂解地块。辽吉弧后盆地在扩张过程中,地壳的强烈伸展减薄伴随着软流圈地幔上涌作用引起太古宙基底(TTG)发生部分熔融继而导致辽吉花岗岩岩浆活动。大陆弧后辽吉地区的伸展作用是否经历了早期的多期陆壳伸展拉张,并且足够强大以致拉张出弧后洋壳,仍需进一步深入研究。

## 5 结论

(1)黑沟碱长花岗岩富硅、碱,贫钙、镁、铝,富集 Th、U、Zr、Hf、Ga、Y,亏损 Sr、Ba、Ti、P、Eu,具有较高的  $(K_2O + Na_2O)/Al_2O_3$ 、 $FeO^F/MgO$ 、Ga/Al 比值,属碱性、弱过铝质 A 型花岗岩。

(2)黑沟碱长花岗岩锆石 LA-ICP-MS 测年结果为  $2186.5 \pm 6.5$  Ma,形成时代为古元古代。锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$  值为  $-0.96 \sim +4.58$ ,两阶段模式年龄  $t_{DM_2}$  为 2476~2821 Ma。综合岩石的地球化学特征,显示黑沟碱长花岗岩的原始岩浆来源于华北克拉通太古宙 TTG 片麻岩在浅部地壳部分熔融。

(3)区域地质、岩石学、岩石地球化学、同位素特征等资料共同表明辽吉地区在古元古代中期(2.1~2.2Ga)处于大陆弧后盆地构造环境,强烈的弧后伸展作用形成了黑沟碱长花岗岩。

**致谢:**审稿人和编辑对本文的撰写提出诸多宝贵意见和建议,在此一并表示衷心感谢!

## References

Bai Jin, Huang Xueguang, Dai Fengyan, Wu Changhua. 1993. Precambrian Crustal Evolution of China. Beijing: Geological Publishing House, 68~119. (in Chinese with English abstract)

Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605~625.

Bébin J, Dautaj N, Shallo M, Turku I, Barbarin B. 1997. Diversity of ophiolitic plagiogranites; The Albanian example. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Series IIA Earth and Planetary Science*, 324(11): 875~882.

Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Petrology*, 143: 602~622.

Chen Bin, Li Zhuang, Wang Jialin, Zhang Lu, Yan Xuelong. 2016. Liaodong Peninsula ~2.2Ga magmatic event and its geological significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(2): 303~320. (in Chinese with English abstract)

Chen Rongdu. 1984. A Paleoproterozoic rift basin: Liaodong rift. *Liaoning Geology*, 1(2): 125~133. (in Chinese with English abstract)

Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to SE Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189~200.

Dall'Agnol R, Frost C D, Ramô O T. 2012. IGCP Project 510 "A-type Granites and Related Rocks through Time": Project vita, results, and contribution to granite research. *Lithos*, 151: 1~16.

Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26(1~2): 115~134.

Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7): 641~644.

Frost B R, Barnes C G, Collins W J, Arculus R J, Ellis D J, Frost C D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033~2048.

Hao Defeng, Li Sanzhong, Zhao Guochun, Sun Min, Han Zhongzhu, Zhao Guangtao. 2004. Origin and its constraint to tectonic evolution of Paleoproterozoic granitoids in the eastern Liaoning and Jilin Provinces, North China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1409~1416. (in Chinese with English abstract)

Harris N B W, Marzouki F M H, Ali S. 1986. The Jabel Sayd complex, Arabian shield: Geochemistry constrains on the origin of peralkaline and related granites. *Journal of the Geological Society-London*, 143: 287~295.

Hawkins J W. 1995. Evolution of the Lau Basin: Insights from ODP leg 135. *Active Margins and Marginal Basins of the Western Pacific*: 125~173.

He Gaopin, Ye Huiwen. 1998. Two types of Early Proterozoic metamorphism and its tectonic significance in eastern Liaoning and southern Jilin areas. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2): 152~162. (in Chinese with English abstract)

Hergt J M, Farley K N. 1994. Major element, trace element, and isotope (Pb, Sr and Nd) variations in site 834 basalts: Implications for the initiation of backarc opening. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 135: 471~485.

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. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.

Li Chao, Chen Bin, Li Zhuang, Yang Chuan. 2017. Petrologic and geochemical characteristics of Paleoproterozoic monzogranitic gneisses from Xiuyan-Kuandian area in Liaodong Peninsula and their tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 963~977. (in Chinese with English abstract)

Li Sanzhong, Han Zhongzhu, Liu Yongjiang, Ma Rui. 2001. Continental dynamics and regional metamorphism of the Liaohu Group. *Geological Review*, 47(1): 9~18. (in Chinese with English abstract)

Li Sanzhong, Hao Defeng, Han Zhongzhu, Zhao Guochun. 2003. Paleoproterozoic deep processes and tectono-thermal evolution in the Jiao-Liao Massif. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 328~340.

(in Chinese with English abstract)

- Li S Z, Zhao G C, Sun M, Han Z Z, Luo Y, Hao D F, Xia X P. 2005. Deformation history of the Paleoproterozoic Liaohe assemblage in the eastern block of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 659~674.
- Li S Z, Zhao G C, Sun M, Han Z Z, Zhao G T, Hao D F. 2006. Are the South and North Liaohe Groups of North China Craton different exotic terranes? Nd isotope constraints. *Gondwana Research*, 9(1~2): 198~208.
- Li S Z, Zhao G C, Santosh M, Liu X, Dai L M. 2011. Palaeoproterozoic tectonothermal evolution and deep crustal processes in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: A review. *Geological Journal*, 46(6): 525~543.
- Li Zhuang, Chen Bin, Liu Jingwei, Zhang Lu, Yang Chuan. 2015. Zircon U-Pb ages and their implications for the South Liaohe Group in the Liaodong Peninsula, Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1589~1605. (in Chinese with English abstract)
- Liu Fulai, Liu Pinghua, Wang Fang, Liu Chaohui, Cai Jia. 2015. Progresses and overviews of voluminous meta-sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic/mobile belt, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2816~2846. (in Chinese with English abstract)
- Loiselle M C, Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geological of Society of America*, 11(7): 468.
- Mani P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101, 635~643.
- Lu Xiaoping, Wu Fuyuan, Lin Jingqian, Sun Deyou, Zhang Yanbin, Guo Chunli. 2004a. Geochronological successions of the Early Precambrian granitic magmatism in southern Liaodong Peninsula and its constraints on tectonic evolution of the North China Craton. *Chinese Journal of Geology*, 39(1): 123~138. (in Chinese with English abstract)
- Lu Xiaoping, Wu Fuyuan, Zhang Yanbin, Zhao Chengbi and Guo Chunli. 2004b. Emplacement age and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liaoji granites in Tonghua area, southern Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 381~392. (in Chinese with English abstract)
- Lu Xiaoping, Wu Fuyuan, Guo Jinghui, Yin Changjian. 2005. Late Paleoproterozoic granitic magmatism and crustal evolution in the Tonghua region, Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 721~736. (in Chinese with English abstract)
- Meng En, Liu Fulai, Liu Pinghua, Liu Chaohui, Shi Jianrong, Kong Qingbo, Lian Tao. 2013. Depositional ages and tectonic implications for South Liaohe Group from Kuandian area in northeastern Liaodong Peninsula, Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2465~2480. (in Chinese with English abstract)
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3~4): 215~224
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A C. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- O'Connor J T. 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. US Geological Survey Professional Paper, 525: 79~84.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 3~81.
- Peng P, Wang X P, Windley B F, Guo J H, Zhai M G, Li Y. 2014. Spatial distribution of 1950~1800 Ma metamorphic events in the North China Craton; Implications for tectonic subdivision of the craton. *Lithos*, 202~203: 250~266.
- Popov V S, Bogatov V I, Zhuravlev D Z. 2002. Multiple gabbro-granite intrusive series of the Syrostan pluton, southern Urals; Geochemistry and petrology. *Petrologia*, 10: 389~410.
- Qu Hongxiang, Zang Yong, Lei Guangxin, Wang Zhijun, Cheng Peiqi, Zang Fusheng. 2000. On the Paleoproterozoic crust-mantle mixed complex in East Liaoning. *Liaoning Geology*, 17(3): 199~205. (in Chinese with English abstract)
- Ren Yunwei, Wang Huichu, Kang Jianli, Chu Hang, Tian Hui. 2017. Paleoproterozoic magmatic events in the Hupiyu area in Yingkou, Liaoning Province and their geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 91(11): 2456~2472. (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. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2620~2636. (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.
- Wang Huichu, Lu Songnian, Chu Hang, Xiang Zhenqun, Zhang Chagjie, Liu Huan. 2011. Zircon U-Pb age and tectonic setting of meta-basalts of Liaohe Group in Helan area, Liaoyang, Liaoning Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1322~1334, 1361. (in Chinese with English abstract)
- Wang Huichu, Ren Yunwei, Lu Songnian, Kang Jianli, Chu Hang, Yu Hongbin, Zhang Chagjie. 2015. Stratigraphic units and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liao-Ji orogeny. *Acta Geoscientia Sinica*, 36(5): 583~598. (in Chinese with English abstract)
- Wang Xiangjian, Liu Jianhui, Ji Lei. 2017. Zircon U-Pb chronology, geochemistry and their petrogenesis of Paleoproterozoic monzogranitic gneisses in Kuandian area, eastern Liaoning Province, Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9): 2689~2707. (in Chinese with English abstract)
- Waston E B, Harrison, T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effect in a variety of crustal magmas types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295~304.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.
- Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to question of non-orogenic granite genesis. *Geological Magazine*, 106: 370~384.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Fei. 2007a. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220. (in Chinese with English abstract)
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007b. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217~1238. (in Chinese with English abstract)
- Wu F Y, Zhao G C, Wilde S A, Sun D Y. 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 523~545.
- Wu F Y, Han R H, Yang J H, Wilde S A, Zhai M G, Park S C. 2007a. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 238(3~4): 232~248.
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Liu X M, Guo J H, Zhai M G. 2007b. Detrital zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the crustal evolution of North Korea. *Precambrian Research*, 159(3~4): 155~177.
- Wu Fuyuan, Li Qiuli, Yang Zhenghe, Jin Zhengnan, Han Longyuan. 2016. Crustal growth and evolution of the Rangnim Massif, northern Korean Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 2933~2947. (in Chinese with English abstract)
- Xu Wang, Liu Fulai, Liu Chaohui. 2017. Petrogenesis and geochemical characteristics of the North Liaohe metabasic rocks, Jiao-Liao-Ji orogenic belt and their tectonic significance.

- Acta Petrologica Sinica, 33(9):2743~2757. (in Chinese with English abstract)
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Xie Liewen, Liu Xiaoming. 2007. Petrogenesis and tectonic implications of Kuangdonggou syenites in the Liaodong Peninsula, East North China Craton: Constraints from in-situ zircon U-Pb ages and Hf isotopes. Acta Petrologica, 23(2):263~276. (in Chinese with English abstract)
- Yang Mingchun, Chen Bin, Yan Cong. 2015. Petrogenesis of Paleoproterozoic gneissic granites from Jiao-Liao-Ji Belt of North China Craton and their tectonic implications. Journal of Earth Sciences and Environment, 37(5):31~51. (in Chinese with English abstract)
- Zhai Mingguo, Peng Peng. 2007. Paleoproterozoic events in the North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 23(11):2665~2682. (in Chinese with English abstract)
- Zhai M G, Guo J H, Li Z, Chen D Z, Peng P, Li T S, Hou Q L, Fan Q C. 2007. Linking the Sulu UHP belt to the Korean Peninsula: Evidence from eclogite, Precambrian basement, and Paleozoic sedimentary basins. Gondwana Research, 12(4):388~403.
- Zhai M G, Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. Gondwana Research, 20(1):6~25.
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, Wang Yuanlong, Jin Weijun, Jia Xiuqin. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications. Acta Petrologica Sinica, 22(9):2249-2269. (in Chinese with English abstract)
- Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chendong, Jin Weijun, Jia Xiuqin. 2007. Are discrimination diagrams always indicative of correct tectonic settings of granites? Some crucial questions on granite study(3). Acta Petrologica Sinica, 23(11):2683-2698. (in Chinese with English abstract)
- Zhang Qiusheng. 1988. Early Crust and Mineral Deposits of Liaodong Peninsula. Beijing: Geological Publishing House, 276~331. (in Chinese with English abstract)
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, Li S Z. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. Precambrian Research, 136(2):177~202.
- Zhao G C, Cao L, Wilde S A, Sun M, Choe W J, Li S Z. 2006. Implications based on the first SHRIMP U-Pb zircon dating on Precambrian granitoid rocks in North Korea. Earth and Planetary Science Letters, 251(3~4):365~379.
- Zhao G C, Cawood P A, Li S Z, Wilde S A, Sun M, Zhang J, He Y H, Yin C Q. 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion. Precambrian Research, 222~223:55~76.
- ### 参 考 文 献
- 白瑾, 黄学光, 戴凤岩, 吴昌华. 1993. 中国前寒武纪地壳演化. 北京:地质出版社, 68~119.
- 陈斌, 李壮, 王家林, 张璐, 鄢雪龙. 2016. 辽东半岛~2.2Ga 岩浆事件及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 46(2):303~320.
- 陈荣度. 1984. 一个早元古代裂谷盆地——辽东裂谷. 辽宁地质, 1(2):125~133.
- 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 刘翠, 赵国春, 吴宗絮, 刘勇. 2007. 火成岩组合与构造环境: 讨论. 高校地质学报, 13(3):392~402.
- 郝德峰, 李三忠, 赵国春, 孙敏, 韩宗珠, 赵广海. 2004. 辽吉地区古元古代花岗岩成因及对构造演化的制约. 岩石学报, 20(6):1409~1416.
- 贺高品, 叶慧文. 1998. 辽东-吉南地区早元古代两种类型变质作用及其构造意义. 岩石学报, 14(2):152~162.
- 李超, 陈斌, 李壮, 杨川. 2017. 辽东岫岩-宽甸地区古元古代条痕状花岗岩的岩石地球化学特征及其构造意义. 岩石学报, 33(3):963~977.
- 李三忠, 韩宗珠, 刘永江, 杨振升, 马瑞. 2001. 辽河群区域变质特征及其大陆动力学意义. 地质论评, 47(1):9~18.
- 李三忠, 郝德峰, 韩宗珠, 赵国春, 孙敏. 2003. 胶辽地块古元古代构造—热演化与深部过程. 地质学报, 77(3):328~340.
- 李壮, 陈斌, 刘经纬, 张璐, 杨川. 2015. 辽东半岛南辽河群锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 岩石学报, 31(6):1589~1605.
- 刘福来, 刘平华, 王舫, 刘超辉, 蔡佳. 2015. 胶-辽-吉古元古代造山/活动带巨量变沉积岩系的研究进展. 岩石学报, 31(10):2816~2846.
- 路孝平, 吴福元, 林景纪, 孙德有, 张艳斌, 郭春丽. 2004a. 辽东半岛南部早寒武纪花岗岩质岩浆作用的年代学格架. 地质科学, 39(1):123~138.
- 路孝平, 吴福元, 张艳斌, 赵成弼, 郭春丽. 2004b. 吉林南部通化地区古元古代辽吉花岗岩的侵位年代与形成构造背景. 岩石学报, 20(3):381~392.
- 路孝平, 吴福元, 郭敬辉, 殷长建. 2005. 通化地区古元古代晚期花岗岩质岩浆作用与地壳演化. 岩石学报, 21(3):721~736.
- 孟恩, 刘福来, 刘平华, 刘超辉, 施建荣, 孔庆波, 廉涛. 2013. 辽东半岛东北部宽甸地区南辽河群沉积时限的确定及其构造意义. 岩石学报, 29(7):2465~2480.
- 曲洪祥, 张永, 雷广新, 王志军, 程培起, 张福生. 2000. 试论辽东地区古元古代壳幔混合杂岩. 辽宁地质, 17(3):199~205.
- 任云伟, 王惠初, 康健丽, 初航, 田辉. 2017. 辽宁营口虎皮峪地区古元古代岩浆事件及地质意义. 地质学报, 91(11):2456-2472.
- 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. 地质学报, 90(10):2620~2636.
- 王惠初, 陆松年, 初航, 相振群, 张长捷, 刘欢. 2011. 辽阳河栏地区辽河群中变质基性熔岩的锆石 U-Pb 年龄与形成构造背景. 吉林大学学报(地球科学版), 41(5):1322~1334, 1361.
- 王惠初, 任云伟, 陆松年, 康健丽, 初航, 于宏斌, 张长捷. 2015. 辽吉古元古代造山带的地层单元划分与构造属性. 地球学报, 36(5):583~598.
- 王祥俭, 刘建辉, 冀磊. 2017. 胶-辽-吉带辽东宽甸地区古元古代二长(正长)花岗岩质片麻岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成因. 岩石学报, 33(9):2689~2707.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007a. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2):185~220.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007b. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6):1217~1238.
- 吴福元, 李秋立, 杨正赫, 金正男, 韩龙渊. 2016. 朝鲜北部狼林地块构造归属与地壳形成时代. 岩石学报, 32(10):2933~2947.
- 许王, 刘福来, 刘超辉. 2017. 胶-辽-吉造山带北辽河变基性岩的成因、地球化学属性及其构造意义. 岩石学报, 33(9):2743~2757.
- 杨进辉, 吴福元, 谢烈文, 柳小明. 2007. 辽东矿洞沟正长岩成因及其构造意义: 锆石原位微区 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约. 岩石学报, 23(2):263~276.
- 杨明春, 陈斌, 闫聪. 2015. 华北克拉通胶-辽-吉带古元古代条痕状花岗岩成因及其构造意义. 地球科学与环境学报, 37(5):31~51.
- 翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件. 岩石学报, 23(11):2665~2682.
- 张旗, 潘国强, 李承东, 金惟俊, 贾秀勤. 2007. 花岗岩构造环境问题: 关于花岗岩研究的思考之三. 岩石学报, 23(11):2683~2698.
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 22(9):2249~2269.
- 张秋生. 1988. 辽东半岛早期地壳与矿床. 北京:地质出版社, 276~331.

# Chronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Paleoproterozoic alkali feldspar granite from the Heigou area in the eastern Liaoning Province: constraints on the tectonic evolution of the Liao-Ji orogenic belt

YANG Yuwei<sup>1)</sup>, YU Chao<sup>\*2)</sup>, WANG Guangwei<sup>2)</sup>, SU Te<sup>2)</sup>, YANG Xinyu<sup>2)</sup>, ZHANG Tianyuan<sup>2)</sup>

1) *Geophysical Measuring Exploration Institute of Liaoning Province, Shenyang, 110031;*

2) *Liaoning Survey Academy of Geology and Mineral Resources Investigation, Shenyang, 110031;*

*\* Corresponding author; 286149526@qq.com*

## Abstract

The middle Paleoproterozoic (2.1~2.2 Ga) magma in the eastern orogenic belt of the north China craton recorded important crustal evolution information in the early stage of the orogenic belt, which is of great significance for understanding the Paleoproterozoic geological evolution in the Liaoning-Jilin orogenic belt. In this paper, we have studied petrology, geochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf isotope characteristics of Paleoproterozoic alkali feldspar granite in the Heigou area, eastern Liaoning province. The zircon U-Pb dating result of the granite by LA-ICP-MS was  $2186.5 \pm 6.5$  Ma, and the formation age was Paleoproterozoic. The rocks belong to the alkaline and weakly peraluminous A-type granites. The rocks are high in Si and rich in alkali, poor in Ca, Mg and Al, extremely rich in sodium and poor in potassium. They are also rich in the HFSEs (such as Hf, Zr, Nb, Y), deficient in the LILEs (such as Rb, K, Ba), have high  $(K_2O+Na_2O)/Al_2O_3$ , FeOT/MgO, Ga/Al ratios, and negative Eu anomaly. The rare earth elements distribution curve shows the right-leaning seagull pattern. The saturation temperature of zircon ranges is between 857 °C and 884 °C, and has a very low Sr and high Yb characteristic, indicating that the rock was formed in the extensional tectonic background of low pressure and high temperature.  $\epsilon_{Hf}(t)$  values of zircons in the granites range from  $-0.96 \sim +4.58$ , and two-stage Hf model ages ( $t_{DM_2}$ ) are 2476~2821 Ma, which are significantly older than the zircon U-Pb ages of the granites. Combined with lithogeochemical characteristics, it indicates that the Paleoproterozoic granites were derived from partial melting of Archean TTG gneisses under an extensional environment at shallow crustal level. Based on the data of petrology, geochemistry and isotopic characteristics, the Liaoning-Jilin region was likely to be in the tectonic environment of continental back-arc basin in the early Paleoproterozoic, and the Heigou alkali feldspar granite is the product of the extensional environment of back-arc basin.

**Key words:** Paleoproterozoic; Liao-Ji orogen; zircon Hf isotopes; A-type granites; back-arc basin