

吉南老岭地区早白垩世铝质A型花岗岩的厘定及其构造意义

秦亚¹, 梁一鸿¹, 胡兆初², 冯坚¹, 李敏¹

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 主微量元素分析和LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄显示吉南老岭地区的头道、老岭、上绿水桥和高台子岩体为一套早白垩世铝质A型花岗岩。主要岩性为钾长花岗岩、晶洞钾长花岗岩、花岗斑岩和花岗岩。LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为121~125 Ma。主量元素具有富Si、alk, 贫Fe、Mg、Ca、Ti的特征; 微量元素亏损Ba、Sr、Ti、Nb、Ta、P, 富集K、Rb、Th等不相容元素; 稀土元素具有中等到强烈的负铕异常及右倾海鸥型的球粒陨石标准化稀土配分模式。元素地球化学特征表明岩体为铝质A型花岗岩($A/CNK=0.82\sim1.15$, $A/NK=1.00\sim1.28$)。岩石具有较低的不相容元素Ce/Nb、Y/Nb、Yb/Ta比值, 为 A_1 型非造山花岗岩。研究表明吉南老岭地区早白垩世时处于非造山的伸展构造环境, 是华北板块东部早白垩世伸展地球动力学背景在吉林南部地区的岩浆活动体现。

关键词: 地质年代学; 铝质A型花岗岩; 伸展构造环境; 地球化学; 吉南。

中图分类号: P588.12

文章编号: 1000-2383(2013)04-0677-12

收稿日期: 2012-12-27

Confirmation of Aluminous A-Type Granite Emplacement and Its Tectonic Significance during Early Cretaceous in the Laoling Area, South of Jilin Province

QIN Ya¹, LIANG Yi-hong¹, HU Zhao-chu², FENG Jian¹, LI Min¹

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Major and trace elements analysis and LA-ICP-MS zircon U-Pb ages show Toudao, Laoling, Shanglvshuiqiao and Gaotaizi plutons are Early Cretaceous aluminum A-type granites in the Laoling area, South of Jilin Province. Plutons mainly consist of k-feldspar granite, miarolitic k-feldspar granite, granite porphyry and granites. The results of LA-ICP-MS dating are (121–125) Ma. The major elements of granitoids are high in Si, alk and low in Fe, Mg, Ca, and Ti. Trace elements are enriched in incompatible elements such as K, Rb, Th and depleted in Ba, Sr, Ti, Nb, Ta, and P. The granitoids have right-wing type of chondrite-normalized REE patterns and moderate negative Eu anomalies. Geochemical features indicate that granitoids are aluminum A-type granites ($A/CNK=(0.82\sim1.15)$, $A/NK=(1.00\sim1.28)$). Granitoids with relatively low incompatible element ratio values such as Ce/Nb, Y/Nb and Yb/Ta are A_1 -type anorogenic granite. The formation of A_1 -type granite indicates Laoling area is in the Anorogenic extensional tectonic setting during Early Cretaceous.

Key words: geochronology; aluminous A-type granite; extensional tectonic environment; geochemistry; South of Jilin Province.

A型花岗岩最早由Loiselle and Wones(1979)提出, 以碱性、贫水和非造山为特征, 不仅包括碱性花岗岩, 也含有铝质或过铝质花岗岩。A型花岗岩相

较于I型或S型花岗岩, 具有较高的 $10\ 000\times Ga/Al$ 、 $TFeO/MgO$ 比值, 富集HFSE、Y, 低Ca、贫Fe和Mg; 强烈亏损Sr、Ba、Eu、P、Ti等特征(Whalen

et al., 1987; 袁忠信, 2001; 苏玉平和唐洪峰, 2005; 吴锁平等, 2007; 李小伟等, 2010; 魏红艳等, 2012; 陈超等, 2013). 从不同的划分角度, A型花岗岩具有不同的划分方案, Eby(1992)根据地球化学特点将其分为与洋岛玄武岩相似的A₁型和与岛弧拉斑玄武岩相似的A₂型; 许保良等(1998)根据物质来源将其分为富集型和亏损型; 洪大卫等(1995)和Eby(1992)根据构造环境将其分为非造山和造山后两种类型。非造山A型花岗岩代表大陆裂谷或板内背景下的岩浆作用, 不相容元素Rb、Ce、Y、Nb、Zr、Hf、Ta等的比值相对较低; 而造山后A型花岗岩则代表后碰撞或后造山环境, 其不相容元素比值则相对较高。

华北板块东部在晚燕山期经历了强烈的构造岩浆活动, 辽南变质核杂岩(刘俊来等, 2008; 林伟等, 2011)、辽东半岛的古道岭、饮马湾山同构造岩体(林伟等, 2011)、断陷盆地(段秋梁等, 2007; 林伟等, 2011)及大量早白垩世花岗岩体(吴福元等, 2005)均是这一时期的产物。花岗岩是大陆地壳主要组成部分之一, 其形成与所处构造环境息息相关。本文通过对吉南老岭地区出露的晚中生代花岗岩的岩石学、

岩石地球化学及年代学特征进行研究, 讨论其形成构造环境, 反映华北板块东部吉南地区早白垩世所处构造背景。

1 地质背景及岩体特征

吉南老岭地区位于华北板块东部、辽吉古元古裂谷带东段。辽吉古元古裂谷带呈向北凸出的弧形分布: 北缘以辽阳—通化断裂为界, 与龙岗地块相接; 南侧以鸭绿江断裂为界, 与朝鲜的狼林地块相邻。区内以NE、EW和SN向构造为主。

区内出露作为结晶基底的太古宙TTG岩系及变质表壳岩。元古宙集安群和老岭群及辽吉花岗岩(路孝平等, 2004, 2005)。集安群是一套变质中基性火山岩和变质碎屑岩, 是裂陷期火山沉积作用的产物; 老岭群为一套变质的碎屑岩和碳酸盐岩, 是凹陷期沉积作用的产物。新元古代—古生代该区接受盖层沉积。中生代为断陷盆地沉积。

该区中生代花岗岩广泛分布。岩体呈岩基或岩株状侵入于中生代火山—沉积岩和前寒武纪变质岩

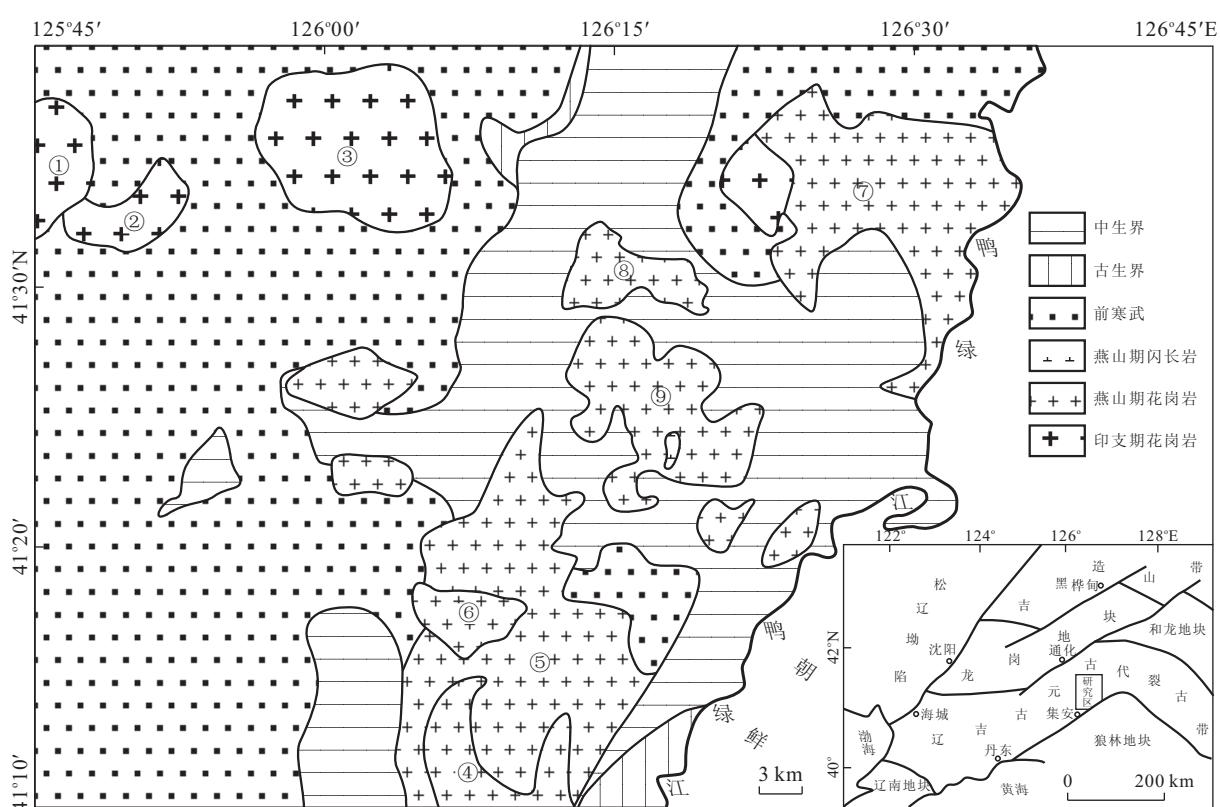


图1 花岗岩体地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of granite plutons

①岔信子; ②小苇沙河; ③龙头; ④通沟; ⑤高台子; ⑥上绿水桥; ⑦头道沟; ⑧石湖; ⑨老岭

系中(图1).本文就其中的头道沟岩体、老岭岩体、上绿水桥岩体和高台子岩体进行了同位素年代学和地球化学研究.

上绿水桥岩体主要岩石类型为晶洞钾长花岗岩,呈肉红色,似斑状结构、块状构造和晶洞构造,镜下为显微文象结构和花斑结构.其主要矿物组成为钾长石(50%~60%)、石英(25%~30%)、斜长石(5%~10%)、黑云母(<5%)等.岩体侵位较浅,层节理发育,后期脉岩活动较少.晶洞构造为该岩体特有的标志.

头道沟岩体主要岩石类型为钾长花岗岩,可见暗色包体呈椭圆状产出.钾长花岗岩呈似斑状结构,块状构造,镜下为显微文象结构、花斑结构.其主要矿物成分为石英(15%~25%)、钾长石(45%~55%)、斜长石(15%~25%)和黑云母(<10%).

老岭岩体主要岩石类型为花岗斑岩和花岗岩.花岗斑岩具有斑状结构、块状构造,基质为微晶结构、隐晶质结构,斑晶约占35%,主要矿物成分为斜长石、钾长石和石英.石英:他形粒状,粒径0.5~3.0 mm,约占25%;斜长石:自形到半自形晶,粒径为0.5~1.0 mm,可见聚片双晶、卡纳复合双晶,晶面具有轻微的高岭土化,含量约占30%±;钾长石:自形板状,粒径为0.5~2.0 mm,发育卡氏双晶,含

量约占40%.花岗岩具有中粒花岗结构,镜下为文象结构、花斑结构和块状构造.其主要矿物为石英、斜长石、钾长石及暗色矿物黑云母和微量角闪石.

高台子岩体主要岩石类型为钾长花岗岩,可见椭圆状暗色包体.钾长花岗岩呈似斑状结构,块状构造.镜下为显微文象结构、花斑结构.其主要矿物成分为石英(25%±)、钾长石(45%±)、斜长石(20%±)及少量黑云母.

2 锆石U-Pb同位素定年

2.1 测试方法

运用LA-ICP-MS对本文所讨论的岩体进行锆石U-Pb同位素年龄测定,年龄测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成.实验室ICP-MS设备使用Agilent 7500a,U-Pb定年采用GeoLas2005 193 nm激光发生器作为剥蚀系统,分析激光束斑直径均为32 μm,脉冲频率为6 Hz.利用ICPMSDataCal 7.9对锆石U-Pb同位素进行分馏校正、积分信号区间调整和比值年龄测算.详细的仪器操作条件和数据处理方法参见Liu et al. (2009, 2010).数据结果利用Isoplot 3进行年龄拟合计算及协和图的绘制.



图2 花岗岩体阴极发光(CL)图像

Fig. 2 CL images of zircon

a. 头道沟岩体;b. 高台子岩体;c. 老岭岩体;d. 上绿水桥岩体

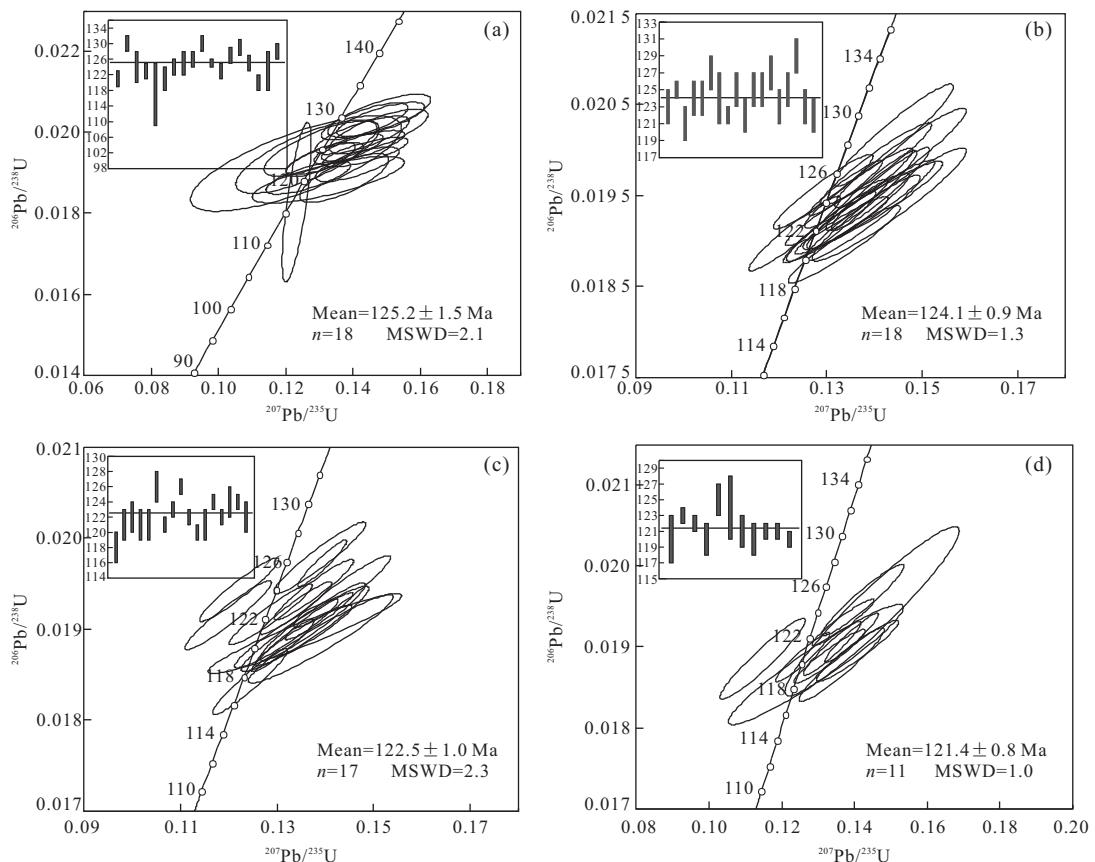


图3 花岗岩体锆石U-Pb谐和曲线

Fig. 3 Concordia diagrams

a. 头道岩体; b. 高台子岩体;c. 老岭岩体;d. 上绿水桥岩体

2.2 测试结果

所测锆石为淡黄色透明柱状晶体,粒径为60~250 μm。高台子岩体Th和U含量分别为(160.46~865.46)×10⁻⁶和(150.60~753.76)×10⁻⁶,Th/U比值为0.59~1.36;老岭岩体Th和U含量分别为(175.59~1 851.23)×10⁻⁶和(227.65~1 871.05)×10⁻⁶,Th/U比值为0.62~1.45;上绿水桥岩体Th和U含量分别为(380.37~1 588.40)×10⁻⁶和(291.33~1 066.46)×10⁻⁶,Th/U比值为0.74~1.75;头道岩体Th和U含量分别为(27.11~305.14)×10⁻⁶和(50.64~324.07)×10⁻⁶,Th/U比值为0.51~1.27。阴极发光图像中,可见明显的岩浆振荡环带(图2),为典型的岩浆锆石。所测年龄值可以代表岩体侵位年龄。

对4个岩体共进行了64粒单颗粒锆石测试,同位素分析数据均落在谐和线上及其附近(图3)。头道岩体共测试了18粒锆石,其加权平均年龄为125.2±1.5 Ma,WSMD=2.1;高台子岩体共测试了18粒单颗粒锆石,其加权平均年龄为124.1±

0.9 Ma,WSMD=1.3;老岭岩体共测试了17粒单颗粒锆石,加权平均年龄为122.5±1.0 Ma,WSMD=2.3;上绿水桥岩体测试了11粒单颗粒锆石,加权平均年龄为121.4±0.8 Ma,WSMD=1.0。4个岩体均为早白垩世的产物。与辽东早白垩世花岗岩体117~131 Ma的形成年龄(吴福元等,2005)相当。

3 岩石地球化学特征

岩体的常量元素的测定由吉林大学测试科学实验中心用AAS法完成;稀土元素和微量元素的测定用ICP-MS完成。

3.1 常量元素

吉南老岭地区早白垩世花岗岩体具有富Si、alk,贫Fe、Mg、Ca、Ti等常量元素特征(表2),其中SiO₂=71.60%~76.34%,alk=7.13%~9.59%,TFe₂O₃=1.37%~2.58%,MgO=0.02%~0.49%,CaO=0.15%~1.77%,TiO₂=0%~

表1 花岗岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄数据
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb zircon age data for granite plutons

	$^{238}\text{Th}(\text{10}^{-6})$	$^{238}\text{U}(\text{10}^{-6})$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	比值($\pm 1\sigma/100$)		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$					
高台子岩体										
J0101	235.63	256.22	0.92	0.052 4±0.29	0.137 5±0.80	0.019 3±0.03	305±103	131±7	123±2	
J0102	865.46	753.76	1.15	0.049 6±0.19	0.134 0±0.51	0.019 6±0.02	174±69	128±5	125±1	
J0103	195.85	292.64	0.67	0.052 1±0.31	0.133 7±0.78	0.019 0±0.03	290±105	127±7	121±2	
J0104	252.39	229.99	1.10	0.052 9±0.35	0.139 7±0.97	0.019 4±0.03	323±128	133±9	124±2	
J0105	218.55	266.23	0.82	0.054 5±0.41	0.139 3±0.88	0.019 4±0.03	390±113	132±8	124±2	
J0106	262.80	243.69	1.08	0.054 0±0.36	0.145 4±0.91	0.019 9±0.04	373±109	138±8	127±2	
J0107	160.46	150.60	1.07	0.053 6±0.42	0.143 2±1.07	0.019 4±0.04	353±131	136±9	124±3	
J0108	327.47	480.12	0.68	0.050 6±0.25	0.133 2±0.64	0.019 2±0.02	221±92	127±6	122±1	
J0109	504.20	370.11	1.36	0.048 1±0.25	0.129 3±0.69	0.019 5±0.03	103±94	123±6	125±2	
J0110	391.05	422.81	0.92	0.050 1±0.25	0.130 6±0.64	0.019 2±0.03	202±88	125±6	122±2	
J0111	369.57	471.75	0.78	0.052 3±0.24	0.139 3±0.63	0.019 6±0.03	298±76	132±6	125±2	
J0112	251.56	381.66	0.66	0.050 9±0.28	0.136 7±0.75	0.019 6±0.03	236±99	130±7	125±2	
J0113	331.41	305.91	1.08	0.052 5±0.32	0.140 3±0.77	0.019 8±0.03	305±98	133±7	127±2	
J0114	296.56	248.26	1.19	0.051 8±0.36	0.134 4±0.85	0.019 3±0.03	276±115	128±8	123±2	
J0115	220.19	375.18	0.59	0.053 3±0.27	0.141 3±0.68	0.019 6±0.03	342±81	134±6	125±2	
J0116	311.20	263.48	1.18	0.053 1±0.33	0.144 0±0.83	0.020 2±0.04	334±96	137±7	129±2	
J0117	378.96	352.29	1.08	0.050 2±0.27	0.132 1±0.71	0.019 3±0.02	203±101	126±6	123±2	
J0118	520.12	415.98	1.25	0.047 1±0.25	0.123 3±0.64	0.019 1±0.03	52±86	118±6	122±2	
老岭岩体										
J601	644.75	632.75	1.02	0.049 5±0.21	0.124 4±0.51	0.018 4±0.02	169±72	119±5	118±2	
J602	570.54	555.11	1.03	0.052 0±0.51	0.135 8±1.32	0.019 0±0.03	284±226	129±12	121±2	
J603	233.35	373.78	0.62	0.045 5±0.23	0.119 9±0.59	0.019 2±0.03	-28±80	115±5	122±2	
J604	268.74	330.25	0.81	0.052 0±0.34	0.135 8±0.88	0.019 0±0.03	285±118	129±8	121±2	
J605	252.23	258.41	0.98	0.053 4±0.36	0.139 1±0.99	0.018 9±0.03	346±131	132±9	121±2	
J606	256.31	414.44	0.62	0.051 0±0.23	0.138 9±0.63	0.019 8±0.03	241±80	132±6	126±2	
J607	395.29	503.93	0.78	0.051 9±0.26	0.135 6±0.66	0.018 9±0.02	279±91	129±6	121±1	
J608	656.24	865.98	0.76	0.050 8±0.20	0.134 0±0.49	0.019 2±0.02	232±66	128±4	123±1	
J609	1851.23	1871.05	0.99	0.051 1±0.12	0.139 4±0.34	0.019 7±0.02	243±40	133±3	126±1	
J610	389.94	434.42	0.90	0.049 5±0.23	0.128 8±0.57	0.019 2±0.02	171±81	123±5	122±1	
J611	800.14	763.92	1.05	0.050 5±0.17	0.131 3±0.42	0.018 8±0.02	219±56	125±4	120±1	
J612	175.59	227.65	0.77	0.050 8±0.28	0.132 0±0.71	0.019 0±0.03	230±99	126±6	121±2	
J613	291.73	448.92	0.65	0.051 6±0.21	0.137 6±0.55	0.019 4±0.02	269±71	131±5	124±1	
J614	1384.59	955.47	1.45	0.052 5±0.17	0.138 7±0.46	0.019 1±0.02	307±59	132±4	122±1	
J615	420.63	483.81	0.87	0.054 6±0.28	0.143 5±0.66	0.019 4±0.03	396±80	136±6	124±2	
J616	272.25	366.69	0.74	0.045 6±0.20	0.122 2±0.54	0.019 4±0.02	-22±70	117±5	124±1	
J617	430.03	616.61	0.70	0.052 6±0.29	0.137 4±0.72	0.019 1±0.03	312±33	131±6	122±2	

续表1

	$^{232}\text{Th}(\text{10}^{-6})$	$^{238}\text{U}(\text{10}^{-6})$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$\text{Hf值}(\pm 1\sigma/100)$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$				
上绿水桥岩体										
1401	380.37	291.33	1.31	0.049 9±0.62	0.129 4±1.59	0.018 8±0.05	192±227	124±14	120±3	123±1
1402	1 389.61	792.00	1.75	0.051 7±0.21	0.136 8±0.57	0.019 3±0.02	270±76	130±5	122±1	122±1
1403	1 588.40	940.64	1.69	0.052 5±0.18	0.139 2±0.49	0.019 1±0.02	307±61	132±4	130±7	120±2
1404	1 492.81	824.62	1.81	0.052 8±0.31	0.136 5±0.77	0.018 8±0.03	319±99	130±7	125±2	124±4
1405	434.89	365.83	1.19	0.053 8±0.30	0.142 4±0.74	0.019 6±0.03	364±90	135±7	137±14	121±2
1406	1 268.11	1 066.46	1.19	0.054 4±0.62	0.144 8±1.58	0.019 4±0.07	389±181	134±7	120±2	120±2
1407	851.72	637.78	1.34	0.053 3±0.27	0.140 9±0.75	0.019 0±0.03	341±96	110±7	121±1	121±1
1408	491.97	661.81	0.74	0.044 7±0.32	0.114 8±0.78	0.018 9±0.03	-35±113	110±7	121±1	121±1
1409	794.06	781.38	1.02	0.051 6±0.21	0.133 8±0.52	0.019 0±0.02	267±68	128±5	129±6	129±6
1410	528.91	465.62	1.14	0.051 3±0.25	0.133 1±0.65	0.018 9±0.02	252±91	120±4	120±4	120±4
1411	631.04	626.82	1.01	0.048 8±0.21	0.125 8±0.49	0.018 9±0.02	139±71	133±152	121±7	121±2
头道岩体										
2201	165.28	279.05	0.59	0.048 7±0.33	0.126 8±0.83	0.018 9±0.03	366±107	140±8	121±13	124±4
2202	172.54	280.60	0.61	0.053 9±0.34	0.148 3±0.86	0.020 3±0.03	64±190	121±13	123±2	123±2
2203	105.47	129.05	0.82	0.047 3±0.52	0.126 5±1.41	0.019 4±0.06	395±105	130±2	117±8	117±8
2204	162.14	228.92	0.71	0.054 6±0.35	0.141 3±0.83	0.019 2±0.03	370±119	131±8	121±3	121±3
2205	27.11	50.64	0.54	0.054 0±0.48	0.123 3±0.29	0.018 3±0.13	404±104	124±2	125±3	125±3
2206	149.83	280.93	0.53	0.054 8±0.41	0.137 5±0.87	0.018 9±0.04	166±107	111±199	126±7	126±7
2207	164.35	218.24	0.75	0.049 4±0.28	0.131 6±0.76	0.019 4±0.03	317±107	124±10	136±7	136±7
2208	212.35	275.63	0.77	0.048 3±0.43	0.130 4±1.11	0.019 6±0.05	339±124	140±9	130±2	130±2
2209	184.28	299.49	0.62	0.052 7±0.30	0.143 1±0.82	0.019 7±0.03	348±110	136±7	124±6	124±6
2210	90.33	175.38	0.52	0.053 3±0.39	0.147 9±1.01	0.020 4±0.04	171±94	124±6	127±2	127±2
2211	257.83	324.07	0.80	0.053 5±0.30	0.143 7±0.83	0.019 5±0.02	295±119	136±8	129±2	129±2
2212	161.96	215.67	0.75	0.049 5±0.27	0.130 4±0.68	0.019 3±0.03	251±109	171±94	123±2	123±2
2213	140.82	278.80	0.51	0.052 2±0.35	0.142 8±0.93	0.019 9±0.03	271±88	126±13	120±2	120±2
2214	167.96	223.25	0.75	0.051 2±0.30	0.143 6±0.85	0.020 3±0.03	294±217	118±19	123±5	123±5
2215	262.09	268.88	0.97	0.051 7±0.26	0.138 7±0.68	0.019 6±0.03	43±255	140±9	128±2	128±2
2216	123.64	148.17	0.83	0.052 2±0.59	0.132 7±1.5	0.018 8±0.04	349±116	140±9	128±2	128±2
2217	98.91	163.90	0.60	0.046 9±0.79	0.123 1±2.08	0.019 2±0.08	120±4	120±4	120±4	120±4
2218	305.14	239.69	1.27	0.053 5±0.36	0.147 7±0.97	0.020 0±0.04	120±4	120±4	120±4	120±4

表2 花岗岩体常量元素含量(%)
Table 2 Major element values of granite plutons

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	A/CNK	A/NK	K ₂ O/Na ₂ O	TFeO/MgO
高台子岩体														
J002-2	74.41	0.10	12.66	2.15	0.05	0.35	0.87	3.78	5.15	0.07	0.95	1.07	1.36	5.53
J002-3	74.80	0.10	13.63	1.78	0.05	0.33	0.67	3.93	4.35	0.07	1.10	1.22	1.11	4.85
J001-1	71.60	0.24	13.92	2.58	0.09	0.49	0.54	4.32	4.80	0.05	1.05	1.13	1.11	4.74
J005-2	74.54	0.20	11.91	1.96	0.03	0.60	1.77	3.53	5.13	0.03	0.82	1.05	1.45	2.94
J005-6	75.96	0.10	12.17	1.68	0.05	0.29	0.78	3.55	5.07	0.03	0.95	1.07	1.43	5.21
上绿水桥岩体														
J004-4	76.34	0	12.52	1.37	0.03	0.03	0.21	3.32	5.16	0.03	1.10	1.13	1.55	41.09
J004-5	76.30	0.04	12.50	1.47	0.03	0.02	0.15	3.31	5.20	0.05	1.10	1.13	1.57	66.14
J004-8	75.98	0.02	11.83	1.76	0.07	0.04	0.36	3.49	5.14	0.03	0.99	1.05	1.47	39.59
J004-9	75.94	0	12.43	1.44	0.03	0.03	0.56	3.09	5.20	0.04	1.06	1.16	1.68	43.19
老岭岩体														
J006-1	75.54	0	12.14	1.58	0.04	0.04	0.52	3.95	5.14	0.04	0.93	1.01	1.30	35.54
J008-1	74.70	0.02	12.03	1.83	0.06	0.04	0.49	3.64	5.55	0.04	0.93	1.00	1.52	41.17
J009-1	74.52	0.10	13.53	2.43	0.03	0.17	0.44	3.70	4.43	0.04	1.16	1.24	1.20	12.86
J011-3	75.30	0.02	12.32	1.48	0.04	0.08	0.40	3.46	5.64	0.05	0.98	1.04	1.63	16.65
J011-5	75.50	0.04	12.40	1.56	0.03	0.08	0.37	3.25	5.91	0.04	1.00	1.06	1.82	17.55
头道岩体														
J022-3	74.24	0.16	12.62	2.32	0.05	0.31	0.26	4.11	5.28	0.03	0.97	1.01	1.28	6.73
J022-5	75.32	0.16	12.71	1.38	0.04	0.25	0.65	3.51	4.64	0.04	1.06	1.18	1.32	4.97
J022-7	74.26	0.16	12.62	2.38	0.05	0.29	0.22	3.70	5.19	0.05	1.04	1.08	1.40	7.38
J022-9	74.56	0.12	12.64	2.18	0.04	0.25	0.22	3.46	5.19	0.04	1.08	1.12	1.50	7.85
J022-13	74.02	0.12	13.40	1.67	0.05	0.26	0.36	3.97	4.92	0.05	1.07	1.13	1.24	5.78

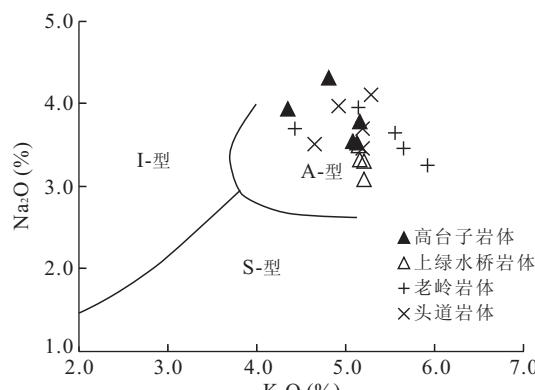
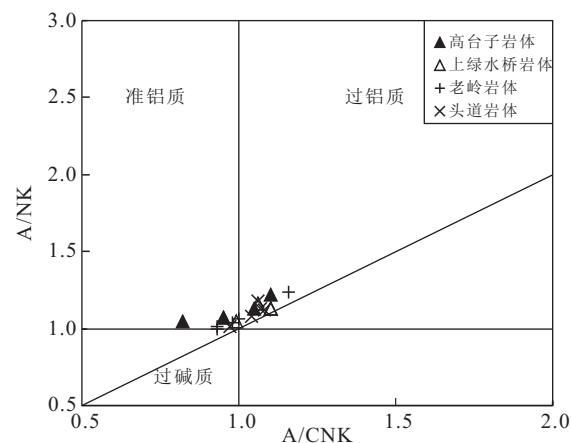
图4 SiO₂-K₂O图解Fig. 4 SiO₂-K₂O diagram of granite

图5 含铝指数图解

Fig. 5 Aluminous index diagram of granite

0.24%。在TAS分类图解中,其为亚碱性系列花岗岩;在SiO₂-K₂O岩石系列判别图解中,为高钾钙碱性系列。岩浆酸性程度高,分异演化强烈,其分异指数(DI)为90.73~96.74,显示出A型花岗岩的常量元素特征。在SiO₂-K₂O成因类型判别图解中,其亦落入A型花岗岩区(图4);另外该区上绿水桥岩体晶洞构造的存在也满足A型花岗岩高温的要求(孙德有等,2005)。Al₂O₃=11.83%~13.92%,含铝指数A/CNK和A/NK分别为0.82~1.15和

1.00~1.28,为准铝质到过铝质系列岩石(图5)。以上特征显示吉南老岭地区早白垩世花岗岩体具有铝质A型花岗岩的常量元素特征。相比之下,后期上绿水桥岩体具有更高的分异指数及更富硅贫铁镁钙钛,表明其分异演化程度更高。

3.2 稀土元素

利用各岩体的稀土元素平均值(表3)作图,得到稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图6),为

表3 花岗岩体稀土微量元素含量(10^{-6})
Table 3 Trace elements and rare earth elements values of granite plutons

稀土元素	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE
高台子岩体															
J002-2	28.83	50.13	5.59	17.75	2.84	0.52	2.41	0.40	2.32	0.44	1.32	0.25	1.63	0.26	114.69
J002-3	34.68	62.98	6.47	19.72	2.99	0.53	2.52	0.38	2.24	0.44	1.34	0.25	1.66	0.26	136.44
J001-1	36.30	71.03	7.27	23.21	3.86	0.64	3.31	0.52	3.03	0.57	1.66	0.30	1.88	0.28	153.84
J005-2	31.43	55.65	5.86	18.44	3.10	0.50	2.73	0.44	2.64	0.51	1.56	0.28	1.85	0.28	125.26
J005-6	24.36	40.32	4.72	15.06	2.77	0.43	2.46	0.42	2.50	0.47	1.42	0.26	1.67	0.24	97.09
上绿水桥岩体															
J004-4	24.62	70.83	6.16	21.35	4.16	0.06	3.82	0.64	3.81	0.72	2.07	0.36	2.19	0.30	141.08
J004-5	22.87	66.58	5.60	18.91	3.53	0.06	3.08	0.51	3.02	0.56	1.64	0.27	1.68	0.24	128.55
J004-8	28.28	81.55	6.64	22.24	4.07	0.06	3.72	0.65	3.83	0.73	2.17	0.37	2.24	0.32	156.86
J004-9	16.35	50.81	4.34	15.47	3.16	0.06	3.00	0.54	3.20	0.61	1.84	0.31	1.94	0.28	101.90
老岭岩体															
J006-1	40.52	96.36	8.91	30.46	5.36	0.23	4.65	0.74	4.14	0.74	2.10	0.34	2.08	0.29	196.93
J008-1	38.63	84.64	8.77	30.67	5.68	0.23	5.08	0.85	4.94	0.92	2.57	0.43	2.6	0.37	186.37
J009-1	46.11	78.45	10.34	36.19	6.90	0.58	6.41	1.05	6.00	1.10	3.10	0.51	3.15	0.44	200.34
J011-3	22.16	41.80	4.67	15.71	3.26	0.24	3.18	0.54	3.12	0.60	1.74	0.29	1.78	0.27	99.38
J011-5	28.09	46.82	5.89	19.42	3.89	0.29	3.95	0.71	4.35	0.80	2.47	0.43	2.74	0.41	120.24
头道岩体															
J022-13	17.25	84.20	3.98	13.28	2.49	0.20	2.18	0.38	2.20	0.41	1.22	0.20	1.20	0.17	129.37
J022-3	33.24	103.70	6.84	22.34	3.66	0.3	3.34	0.55	3.23	0.61	1.76	0.28	1.77	0.23	181.85
J022-5	31.07	97.87	6.88	23.05	4.05	0.29	3.54	0.56	3.22	0.57	1.63	0.27	1.63	0.23	174.85
J022-7	36.46	98.93	8.09	26.72	4.83	0.33	4.05	0.63	3.49	0.63	1.78	0.28	1.69	0.24	188.16
J022-9	23.50	72.32	6.31	21.90	4.37	0.33	3.83	0.70	4.23	0.80	2.37	0.39	2.61	0.37	144.04
微量元素															
高台子岩体															
J002-2	1.71	13.35	3.44	26.69	133.5	158.1	13.61	154.90	12.41	1.55	889.4	5.44	1.92	16.81	1.93
J002-3	1.56	13.00	2.74	26.15	136.9	162.8	13.97	147.60	11.88	1.54	863.7	4.81	1.41	16.48	1.94
J001-1	2.12	9.76	1.54	27.51	153.4	184.8	16.11	204.80	15.63	1.85	893.5	6.28	1.41	17.81	3.11
J005-2	1.90	9.30	1.93	24.76	152.1	133.4	15.15	132.80	13.04	1.28	832.5	4.79	1.45	18.06	3.16
J005-6	1.78	8.63	1.74	23.31	134.8	120.2	14.37	92.09	12.87	1.08	798.4	3.56	1.47	15.66	2.83
上绿水桥岩体															
J004-4	4.28	0.48	0.65	10.65	204.1	6.98	18.44	198.60	23.17	2.54	26.07	8.37	1.82	19.69	5.48
J004-5	3.62	0.40	0.58	10.22	196.4	6.75	14.71	165.10	22.89	2.63	27.16	6.92	1.75	17.48	4.63
J004-8	3.18	0.48	2.15	10.50	204.8	6.65	19.88	175.20	23.92	2.66	24.64	7.37	1.73	18.35	4.82
J004-9	3.99	0.71	2.69	10.22	187.5	7.26	17.22	150.80	21.35	2.40	23.25	6.47	1.65	16.75	4.77
老岭岩体															
J006-1	3.44	0.55	0.79	12.34	180.5	9.11	19.95	189.70	19.82	1.81	124.0	7.31	1.50	18.81	4.28
J008-1	3.73	0.58	0.95	14.10	169.2	18.92	24.23	198.40	19.93	1.92	117.6	7.3	1.52	17.09	4.29
J009-1	2.60	5.96	1.38	24.97	137.9	99.93	30.60	234.90	22.98	2.21	590.7	7.65	1.67	15.24	2.37
J011-3	2.57	2.51	1.47	15.95	190.1	67.81	17.02	98.88	20.70	2.46	364.8	3.99	2.13	16.67	5.06
J011-5	2.43	2.70	0.80	18.67	191.7	76.88	26.06	94.67	20.84	2.51	410.5	3.97	2.25	19.24	5.10
头道岩体															
J022-13	3.28	7.07	2.32	16.45	139.0	66.83	9.90	276.50	27.00	2.79	305.4	8.79	2.44	17.00	3.82
J022-3	4.42	9.00	1.39	18.15	170.4	93.66	14.53	369.20	35.83	3.93	340.6	11.07	2.88	19.70	4.16
J022-5	3.85	7.78	2.13	18.53	140.1	87.04	13.89	278.30	29.30	2.56	340.8	8.85	2.48	20.20	4.03
J022-7	3.56	7.40	1.85	18.39	141.0	82.88	15.57	272.70	28.25	2.65	348.8	8.48	2.44	19.99	3.69
J022-9	3.61	6.98	1.94	24.04	121.1	84.74	19.10	148.50	28.74	2.45	367.6	5.57	2.42	16.19	3.29

LREE 中等富集的右倾海鸥型稀土配分模式。稀土元素总量 Σ REE 为 $(97.09 \sim 200.34) \times 10^{-6}$, 轻重稀土具有中等的分异, LREE 分馏效应明显, HREE

基本无分馏效应(呈平坦的曲线), LREE/HREE = 6.59~15.25, $(La/Yb)_N$ 值为 6.05~15.45。具有中等到强烈的负铕异常, δEu 值为 0.05~0.59, Eu 的

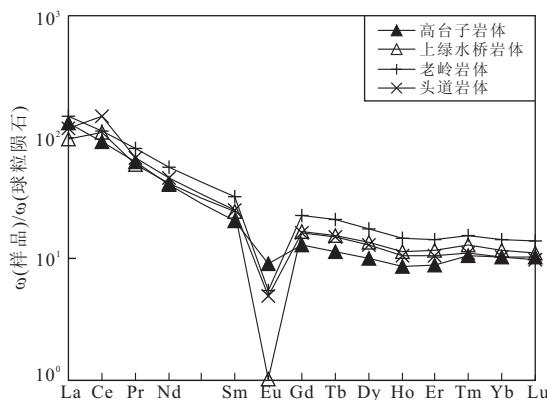


图6 球粒陨石标准化配分模式(据Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE pattern of granite

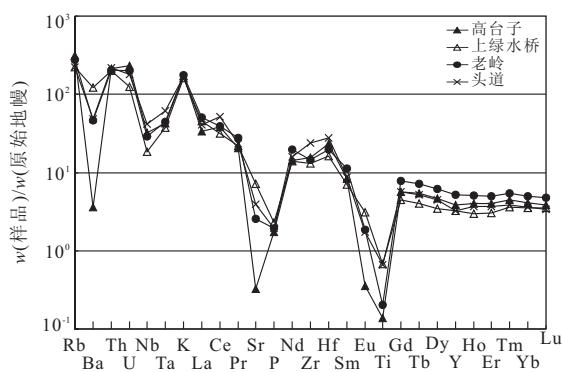


图7 原始地幔标准化蛛网图(据Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Primitive mantle-normalized spider diagram

负异常说明源区存在斜长石的分离结晶作用。而上绿水桥岩体具有特别明显的负铕异常($\delta\text{Eu} = 0.05 \sim 0.06$)，铕的强烈亏损，说明其源区斜长石分离结晶作用更彻底。

3.3 微量元素

4个岩体具有相似的微量元素特点(表3)，在利用各岩体微量元素平均值所做的原始地幔标准化蛛网图(图6)中，呈现出Ba、Nb-Ta、Sr-P、Ti等4个明显的亏损谷，富集K、Rb、Th等不相容元素。但各岩体的亏损富集程度不同，而以上绿水桥岩体的Ba、Sr、Ti亏损最为强烈。岩体的Rb/Sr值为0.84~30.82，Rb/Ba值为0.15~8.31，其变化范围与国内A型花岗岩的Rb/Sr、Rb/Ba比值变化范围相当(吴锁平等, 2007)。

稀土微量元素特征，也显示吉南老岭地区早白垩世花岗岩体具有A型花岗岩的特征(袁忠信, 2001；苏玉平和唐红峰, 2005；吴锁平等, 2007；李小伟等, 2010)。在偏铝质酸性岩中，Sr在斜长石、磷灰石中的分配系数最大，而Ba在黑云母和钾长石中

的分配系数最大，Ti在角闪石和黑云母中的分配系数较高(孙德有等, 2005)，所以Sr、Ba、Eu的强烈亏损，表明斜长石、磷灰石和黑云母发生了分离结晶。P和Ti的亏损则与副矿物磷灰石和钛铁矿的分离结晶有关。而Nb和Ta的强烈亏损说明岩浆可能为地壳来源。上绿水桥岩体Ba、Sr、Ti、Eu等的强烈亏损，说明其岩浆分异演化更深入，这与前面常量元素特征相吻合。

4 构造环境探讨

吉南老岭地区的头道、老岭、上绿水桥和高台子岩体具有富硅碱，贫铁镁钙钛的常量元素特征。高钾钙碱性系列，准铝质到过铝质，具有右倾海鸥型的稀土配分模式，负铕异常明显。强烈亏损Ba、Sr、P、Ti、Nb、Ta，富集K、Rb、Th等微量元素，为铝质A型花岗岩(图4)。

Eby(1992)根据采自不同环境的A型花岗岩样品的微量元素特征，将其分为A₁和A₂两类。A₁型花岗岩样品来自裂谷环境，和热点或地幔柱环境有关。在大陆环境下，代表大陆裂谷或板内背景下的岩浆作用，其不相容元素Rb、Ce、Y、Nb、Zr、Hf、Ta等的比值相对较低；A₂型花岗岩样品来自后碰撞或后造山环境，其不相容元素比值相对较高。

吉南老岭地区早白垩世花岗岩体具有A型花岗岩的矿物组合及岩石地球化学特征，其不相容元素Ce/Nb、Y/Nb、Yb/Ta比值较低，分别变化于2.02~5.30, 0.37~1.33, 0.61~1.88之间。在Ce/Nb-Y/Nb及Yb/Ta-Y/Nb图解中，落入A₁型非造山花岗岩区(图8)。在三角型图解Nb-Y-3×Ga和Nb-Y-Ce中，也为A₁型非造山花岗岩(图8)，说明其为大陆裂谷或板内背景下的岩浆作用产物。

同时，在R₁-R₂构造环境判别图解(图9)中，位于非造山环境的后部，造山后环境的前部，指示形成于非造山的伸展构造背景。印支期以来，由于华北板块和华南板块碰撞作用，中国东部地壳显著增厚。该区三叠纪柯石英榴辉岩(张儒媛等, 1993)以及三叠纪和早侏罗世C型埃达克质岩石的存在就是这个增厚陆壳存在的最好的证明。据研究(杨进辉等, 2008)，当时华北板块东部地区岩石圈厚达180~200 km。而新生代，该区的岩石圈厚约80~120 km，说明燕山期内，华北板块东部岩石圈发生了减薄事件。研究表明(翟明国等, 2004)，华北板块东部由挤压构造向伸展构造转折始于140~150 Ma，终于100~110 Ma，峰期时限为110~120 Ma。说明自

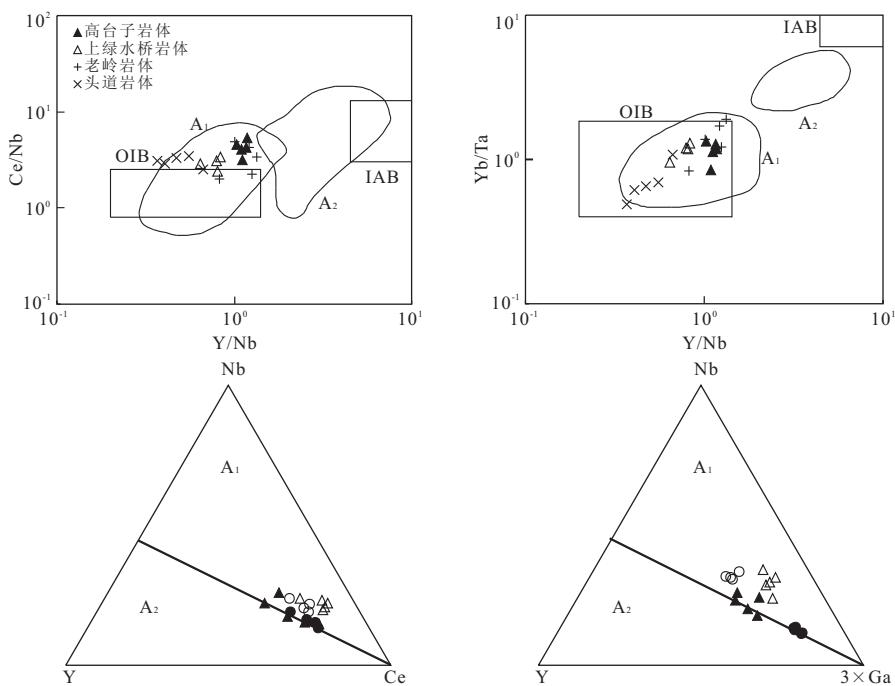
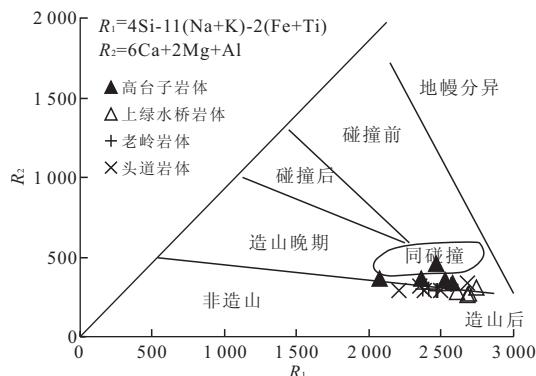


图8 成因类型判别图解

Fig. 8 The diagram showing the genetic type of the A-type granites

图9 R_1 - R_2 图解Fig. 9 R_1 - R_2 diagram

140~150 Ma以来,华北板块东部处于非造山的伸展构造环境。 A_1 型非造山花岗岩的出露,表明造山作用已经结束,进入板内构造演化阶段。本文所研究的吉南老岭地区花岗岩体为 A_1 型非造山花岗岩,其锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄为121~125 Ma的早白垩世,表明吉南老岭地区早白垩世时处于板内构造演化阶段。且该期岩浆事件为华北板块东部早白垩世伸展构造背景在吉南地区的岩浆活动体现。

5 结论

(1)头道沟岩体、老岭岩体、上绿水桥岩体和高

台子岩体的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为121~125 Ma,与辽东早白垩世花岗岩体形成时间相一致117~131 Ma,属早白垩世侵入体。

(2)岩体具有富硅碱、贫铁镁钙铝等常量元素特征,具有中等到强烈的负铕异常及右倾海鸥型球粒陨石标准化稀土配分模式。在原始地幔标准化蛛网图中,亏损P、Ti、Ba、Sr、Nb、Ta,富集K、Rb、Th等不相容元素;准铝质到过铝质,为铝质A型花岗岩。

(3)岩体不相容元素Ce/Nb、Y/Nb、Yb/Ta比值较低,分别变化于2.02~5.30,0.37~1.33和0.61~1.88之间,为 A_1 型非造山花岗岩,是华北板块东部晚燕山期伸展构造体制在吉林南部地区的岩浆活动体现。

致谢:感谢吉林大学测试科学实验中心给予的精细主微量元素测定及中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的工作人员在LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测年中给予的帮助。

References

- Chen, C., Lv, X. B., Cao, X. F., et al., 2013. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Late Carboniferous-Early Permian Granites in Kumishi Area, Xinjiang. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(2): 219—232. doi: 10.3799/dqkx.2013.023(in Chinese with English abstract).

- Duan, Q. L., Tan, W. Y., Yang, C. C., et al., 2007. A Review on the Late Mesozoic Extensional Tectonics on the Eastern North China Craton. *Progress in Geophysics*, 22(2): 403–410 (in Chinese with English abstract).
- Eby, G. N., 1992. Chemical Subdivision of the A-Type Granitoids: Petrogenesis and Implications. *Geology*, 20(7): 641–644. doi:10.1130/0091-7613
- Hong, D. W., Wang, S. G., Han, B. F., et al., 1995. Kind of Tectonic Settings of Alkaline Granite and Discrimination Indicator. *Science China (Series B)*, 25(4): 418–426 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. W., Mo, X. X., Zhao, Z. D., et al., 2010. A Discussion on How to Discriminate A-Type Granite. *Geological Bulletin of China*, 29(2/3): 278–285 (in Chinese with English abstract).
- Lin, W., Wang, Q. C., Wang, J., et al., 2011. Late Mesozoic Extensional Tectonics of the Liaodong Peninsula Massif: Response of Crust to Continental Lithosphere Destruction of the North China Craton. *Sci. China (Series D): Earth Science*, 54: 843–857 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. L., Davis, G. A., Ji, M., et al., 2008. Crustal Detachment and Destruction of the North China Craton: Constraints from Late Mesozoic Extensional Structures. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 72–81 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2009. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons of Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571. doi:10.1093/petrology/egp082
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Zong, K. Q., et al., 2010. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546. doi:10.1007/s11434-010-0052-3
- Lu, X. P., Wu, F. Y., Lin, J. Q., et al., 2004. 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, X. P., Wu, F. Y., Guo, J. H., et al., 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).
- Loiselle, M. C., Wones, D. R., 1979. Characteristics and Origin of Anorogenic Granites. *Geological Society of America*, 11(7): 468.
- Su, Y. P., Tang, H. F., 2005. Trace Element Geochemistry of A-Type Granites. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24(3): 245–251 (in Chinese with English abstract).
- Sun, D. Y., SUZUKI, K., Wu, F. Y., et al., 2005. CHIME Dating and Its Application for Mesozoic Granites of Huanggoushan, Jilin Province. *Chinese Journal of Geochemistry*, 34(4): 305–314 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematic of Oceanic Basalts; Implication for Mantle Compostion and Processes (in Magmatism in Oceanic Basins). *Geological Society Apecial Publication*, 42: 313–345.
- 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.
- Wu, S. P., Wang, M. Y., Qi, K. J., 2007. Present Situation of Researches on A-Type Granites: A View. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 57–66 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Yang, J. H., Liu, X. M., et al., 2005. Geochronological Framework of the Mesozoic Granitic Magmatism in the Liaodong Peninsula. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 305–317 (in Chinese with English abstract).
- Wei, H. Y., Sun, D. Y., Ye, S. Q., et al., 2012. Zircon U-Pb Ages and Its Geological Significance of the Granitic Rocks in the Yichun-Hegang Region, Southeastern Xiao Hinggan Mountains. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(Suppl.): 50–59. doi:10.3799/dqkx.2012. SI. 006 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B. L., Yan, G. H., Zhang, C., et al., 1998. Petrological Subdivision and Source Material of A-Type Granites. *Earth Science Frontiers*, 5(3): 113–124 (in Chinese with English abstract).
- 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 Ablation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of K-bearing Minerals. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1175–1184 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, Z. X., 2001. A Discussion on the Naming of A-Type

- Granite. *Acta Petrological et Mineralogica*, 20(3): 293—296 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. Y., Cong, B. L., Liu, Z. G., et al., 1993. Su-Lu Ultra-high-Pressure Metamorphic Terrane and Explanation of its Origin. *Acta Petrologica Sinica*, 9(3): 211—226 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., 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).
- 附中文参考文献**
- 陈超,吕新彪,曹晓峰,等,2013.新疆库米什地区晚石炭世—早二叠世花岗岩年代学、地球化学及其地质意义.地球科学——中国地质大学学报,38(2):219—232.
- 段秋梁,谭未一,杨长春,等,2007.华北东部晚中生代伸展构造作用.地球物理学进展,22(2):403—410.
- 洪大卫,王式洮,韩宝福,等,1995.碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志.中国科学(B辑),25(4):418—426.
- 李小伟,莫宣学,赵志丹,等,2010.关于A型花岗岩判别过程中若干问题的讨论.地质通报,29(2—3):278—285.
- 刘俊来,Davis, G. A., 纪沫,等,2008.地壳的拆离作用与华北克拉通破坏:晚中生代伸展构造约束.地学前缘,15(3):72—81.
- 林伟,王清晨,王军,等,2011.辽东半岛晚中生代伸展构造—华北克拉通破坏的地壳响应.中国科学(D辑):地球科学,41(5):638—653.
- 路孝平,吴福元,郭敬辉,等,2005.通化地区古元古代晚期花岗质岩浆作用与地壳演化.岩石学报,21(3):721—736.
- 路孝平,吴福元,林景仟,等,2004.辽东半岛南部早前寒武纪花岗质岩浆作用的年代学格架.地质科学,39(1):123—138.
- 苏玉平,唐红峰,2005. A型花岗岩的微量元素地球化学.矿物岩石地球化学通报,24(3):245—251.
- 孙德有,铃木和博,吴福元,等,2005.吉林省南部荒沟山地区中生代花岗岩 CHIME 定年.地球化学,34(4):305—314.
- 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.
- 吴锁平,王梅英,戚开静,2007. A型花岗岩研究现状及其评述.岩石矿物学杂志,26(1):57—66.
- 魏红艳,孙德有,叶松青,等,2012.小兴安岭东南部伊春—鹤岗地区花岗质岩石锆石 U-Pb 年龄测定及其地质意义.地球科学——中国地质大学学报,37(增刊):50—59.
- 许保良,阎国翰,张臣,等,1998. A型花岗岩的岩石学亚类及其物质来源.地学前缘,5(3):113—124.
- 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⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学证据.岩石学报,24(6):1175—1184.
- 袁忠信,2001.关于A型花岗岩命名问题的讨论.岩石矿物学杂志,20(3):293—296.
- 张儒媛,从柏林,刘忠光,等,1993.苏鲁超高压变质地体及其成因解释.岩石学报,9(3):211—226.
- 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.