

# 内蒙古海拉尔北部八大关地区花岗岩的成岩时代、地球化学特征与成因

李 研<sup>1,2</sup>, 王 建<sup>1</sup>, 孙德有<sup>1</sup>, 陈德兵<sup>2</sup>, 韩志滨<sup>2</sup>, 崔家瑞<sup>2</sup>

(1. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 核工业二四〇研究所, 辽宁 沈阳 110032)

**摘要:** 内蒙古海拉尔北部八大关地区花岗岩以正长花岗岩和二长花岗岩为主, 锆石 U-Pb 定年显示其形成于晚三叠世 ( $(212 \pm 1.7) \sim (226.7 \pm 1.6)$  Ma)。岩石为弱过铝质 ( $A/CNK = 1.01 \sim 1.10$ ), 分异指数 (DI) 介于 92.5 ~ 95.8 之间。岩石大离子亲石元素 K 和 Rb 以及 LREE 相对富集, 高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 和 Ba、Sr 相对亏损, 并显示中等铕负异常 ( $\delta Eu = 0.51 \sim 0.71$ )。较低的 10 000 Ga/Al 值 (平均 1.91) 以及较低的锆石饱和温度 (平均 683 °C) 等特征显示该花岗岩属于高分异 I 型。锆石的  $\varepsilon_{Hf}(t)$  值较高 (4.50 ~ 10.45), Hf 二阶段模式年龄为 0.59 ~ 0.97 Ga, 反映其源区物质为新元古代增生的基性地壳。综合区域其他地质研究成果, 认为研究区晚三叠世花岗岩形成于蒙古—鄂霍茨克洋板块俯冲的活动大陆边缘环境。

**关键词:** 花岗岩; 锆石 U-Pb 定年; 岩石成因; 构造背景; 八大关

中图分类号: P588.12<sup>+</sup>1 文献标志码: A 文章编号: 1000-8527(2017)02-0234-12

## Age, Geochemistry and Petrogenesis of Granites from Badaguan Area in Northern Hailaer, Inner Mongolia

LI Yan<sup>1,2</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, SUN Deyou<sup>1</sup>, CHEN Debing<sup>2</sup>, HAN Zhibin<sup>2</sup>, CUI Jiarui<sup>2</sup>

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

2. No. 240 Institute of Nuclear Industry, Shenyang, Liaoning 110032, China)

**Abstract:** The granite of Badaguan is mainly composed of syenogranite and monzonitic granite. Zircon U-Pb isotopic dating yields age of  $(212 \pm 1.7) - (226.7 \pm 1.6)$  Ma, indicating that they were formed in the Late Triassic. The granites are metaluminous with A/CNK ratios of 1.01 - 1.10 and differentiation index (DI) of 92.5 - 95.8. The granites are enriched in K, Rb and LREE, and depleted in Ba, Sr and HFSE, e. g., Nb, Ta, P and Ti, with moderate Eu negative anomalies ( $\delta Eu = 0.51 - 0.71$ ). The relatively low values of 10,000 Ga/Al (average at 1.91), low zircon saturation temperature (average at 683 °C) and other geochemical features suggest that the syenogranite and monzonitic granites in the study area are high differentiation I-type granites. The zircons in the granites show high values of  $\varepsilon_{Hf}(t)$  (4.50 - 10.45) with two-stage Hf model ages of 0.59 - 0.97 Ga, suggesting that they are derived from the newly formed crust which is separated from Neo-Proterozoic depleted mantle. Combined with the U-Pb ages and other geochemical features, we proposed that the granite of Late Triassic formed in an active continental margin setting of the Mongolian-Okhotsk oceanic plate.

**Key words:** granite; zircon U-Pb dating; petrogenesis; tectonic setting; Badaguan

收稿日期: 2016-05-11; 改回日期: 2016-10-15; 责任编辑: 戚开静。

基金项目: 中国地质调查局项目(12120113053700)。

作者简介: 李 研, 男, 硕士研究生, 1990 年出生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事岩石地球化学研究。

Email: 1483792423@qq.com。

通信作者: 王 建, 男, 教授, 博士生导师, 1963 年出生, 地球化学专业, 主要从事岩石地球化学研究。

Email: wangjian304@jlu.edu.cn。

## 0 引言

内蒙古海拉尔北部八大关地区位于中俄两国交界处大兴安岭北部地区,大地构造位置隶属于额尔古纳地块。该区古生代期间经历了多个微陆块之间的碰撞拼合<sup>[1-5]</sup>;在中生代—新生代,又叠加了环太平洋构造域和蒙古—鄂霍茨克构造域的影响,导致岩浆岩极为发育<sup>[6-12]</sup>。前人通过对东北地区花岗质岩石和火山岩的年代学与地球化学研究,揭示了古亚洲洋构造域和环太平洋构造域影响的时间和空间范围<sup>[11,13]</sup>,而对于蒙古—鄂霍茨克构造域对东北地区的影响的了解略显匮乏。目前,对蒙古—鄂霍茨克洋是否存在向南东俯冲作用尚未达成一致的认识。部分学者表示晚二叠世蒙古—鄂霍茨克洋向北部西伯利亚板块俯冲,而此时蒙古—鄂霍茨克洋即终止向南东方向俯冲<sup>[14]</sup>;亦有学者表示额尔古纳地块北段早中生代花岗岩的产生和蒙古—鄂霍茨克洋向南东方向俯冲作用具有密切关联<sup>[15]</sup>。需要明确的是,部分研究者在额尔古纳地块先后发现了三叠纪斑岩型铜钼矿床,其成因与中生代蒙古—鄂霍茨克洋板块向额尔古纳地块方向俯冲作用有关<sup>[16-17]</sup>。故本文以一种新视角看待蒙古—鄂霍茨克洋的构造演化历程及其作用的时空领域,以期更加全面地解决中国东北地区的构造演化问题。

八大关地区位于蒙古—鄂霍茨克缝合带东南部,为了解蒙古—鄂霍茨克洋对研究东北地区区域构造演化的影响,内蒙古第一区域地质调查队于1984年在1:20万区域地质调查报告中将该区花岗岩划为燕山期,主要依据是花岗岩与地层之间的接触关系和K-Ar定年结果,缺乏精确的年代学证据和系统的地球化学研究。这些花岗岩的形成时代、地球化学特征、构造背景及与蒙古—鄂霍茨克洋的演化关系均不明确。鉴于此,笔者对八大关地区花岗岩进行了年代学及岩石地球化学研究,旨在更精准地界定花岗岩的具体形成时期,明确其形成机制以及构造环境。

## 1 地质背景与岩石学特征

八大关地区花岗岩位于内蒙古额尔古纳地块东南部(图1),以正长花岗岩和二长花岗岩(图2)为主,前人报道该区花岗岩为燕山期,区内出露的火山岩地层为中侏罗世塔木兰沟组( $J_2t$ )与晚侏罗世满克头鄂博组( $J_3mk$ )。塔木兰沟组为一套中

基性火山岩夹沉积岩;满克头鄂博组主要为流纹岩、英安岩等酸性火山岩夹火山沉积岩组合,含叶肢介及植物化石。

正长花岗岩呈新鲜面浅红色,中粗粒半自形结构,块状构造。矿物成分为石英(40%~50%)+碱性长石(30%~40%)+斜长石(10%~20%),碱性长石主要为条纹长石和微斜长石,呈板状,粒度为1~6 mm,具卡式双晶,土化严重,斜长石呈半自形板状,聚片双晶发育,可见轻微膝折结构,粒度多为2~3 mm,轻微绢云母化;可见少量不透明暗色矿物,可能为磁铁矿,副矿物可见锆石。

二长花岗岩呈新鲜面灰红色,中细粒半自形结构,块状构造。矿物成分为石英(30%~40%)+碱性长石(35%)+斜长石(30%)+黑云母(3%)。碱性长石主要为条纹长石和微斜长石,为半自形—它形板状,粒度为1~3 mm,具条纹结构和卡式双晶;斜长石为板状,聚片双晶发育;黑云母为片状,呈淡黄—黄棕色多色性;可见轻微绿泥石化,副矿物有锆石、磁铁矿等。

## 2 样品采集与分析测试方法

锆石分选任务由河北省区域地质矿产调查研究所负责,锆石制靶和CL图像采集均于天津地质调查中心完成。LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学测试在吉林大学东北亚矿产资源评价国土资源部重点实验室完成,使用德国相干公司(Coherent)COMPEXPro型ArF准分子激光器,质谱仪为美国安捷伦公司7500A型四极杆等离子质谱。激光条件为:激光束斑直径为32  $\mu\text{m}$ ,激光能量密度为10  $\text{J}/\text{cm}^2$ ,剥蚀频率为8 Hz。在剥蚀样品之前首先采集30 s的空白,随后进行30 s的样品剥蚀,剥蚀完成后进行2 min的样品池冲洗。载气使用高纯度He气,气流量为600  $\text{mL}/\text{min}$ ;辅助气为Ar气,气流量为1.15  $\text{L}/\text{min}$ 。将标准锆石91500(1 062 Ma)视为外标展开同位素比值修正处理,将标准锆石GJ-1视为监控盲样。元素成分将国际标样NIST610视为外标、Si视为内标元素展开计算,其中NIST612与NIST614均为监控盲样。使用Glitter软件进行同位素比值及元素含量的计算,年龄及谐和图使用Isoplot/Ex(3.0)给出。普通铅校正使用Anderson给出的程序计算。分析数据及锆石U-Pb谐和图给出误差为 $1\sigma$ ,表示95%的置信度。锆石原位Lu-Hf同位素分析在中国科学院地质与

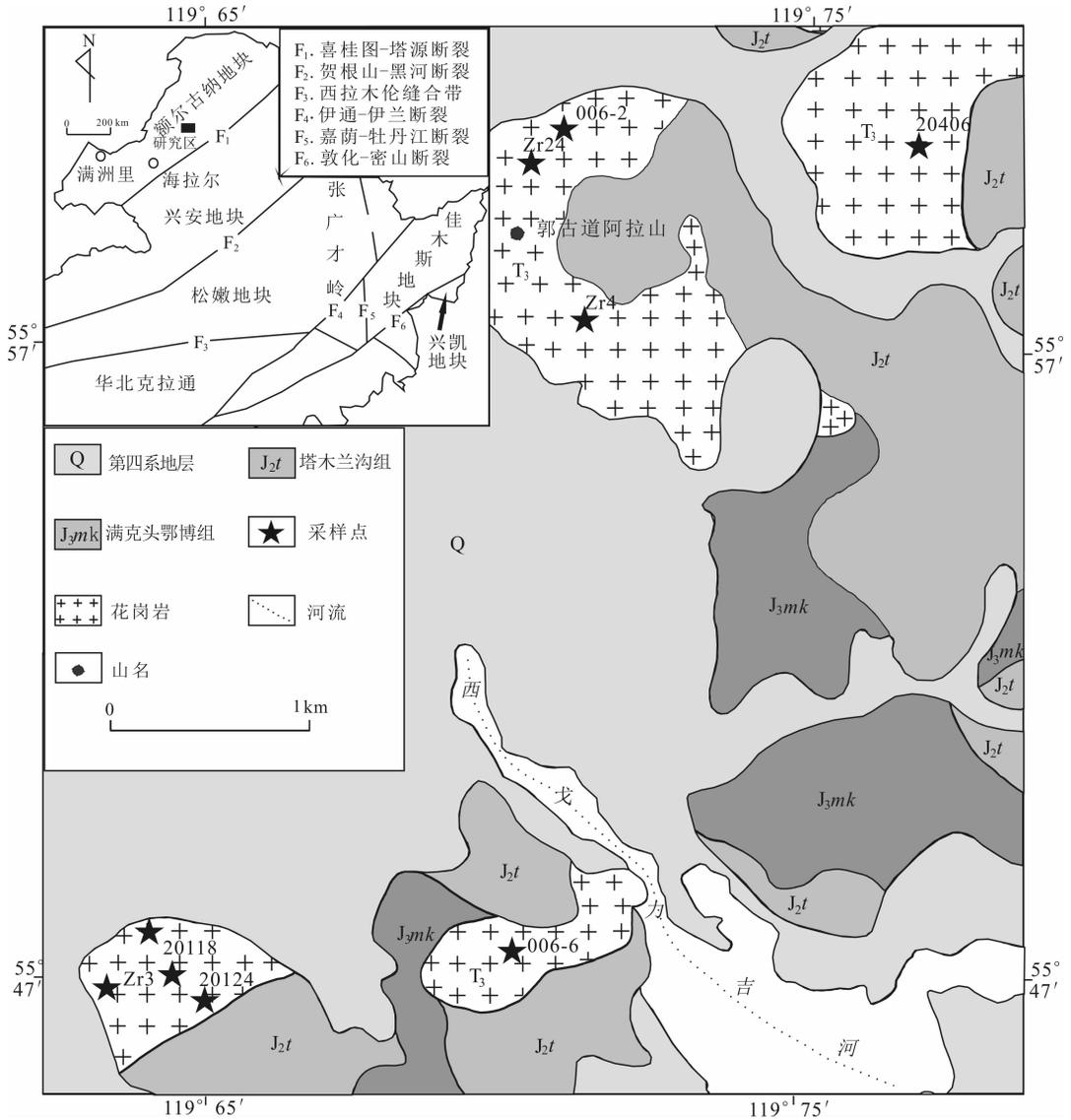


图1 八大关地区花岗岩地质简图及采样点分布(据核工业二四〇研究所1:5万地质图, 2015)

Fig. 1 Sketch geological map of granites and sampling point distribution in Badaguan

地球物理研究所配备具有 193 nm 激光取样系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)上完成, 激光束斑的半径值为 31.5  $\mu\text{m}$ , 激光脉冲宽度是 15 ns, 将 He 气视为剥蚀物质载体。具体测试步骤、仪器使用标准等均见于参考文献 [15]。元素地球化学数据由呼伦贝尔市原野测试公司完成, 主量元素采用 XRF 玻璃熔片法, 精度超过 5%, 稀土与微量元素采用 ICP-MS 法分析, 精度优于 10%。测试样品 8 件, 其中 5 件为正长花岗岩, 3 件为二长花岗岩。

### 3 分析测试结果

#### 3.1 锆石 U-Pb 年代学

所测 3 件花岗岩样品(Zr3、Zr4、Zr24)的锆石

晶形较好, 均呈长柱状或短柱状, 具明显岩浆成因的振荡环带结构(图 3), 锆石的 Th/U 比值皆高于 0.4, 依次是 0.52 ~ 1.13、0.50 ~ 1.25、0.52 ~ 1.06, 表明其为岩浆成因<sup>[18]</sup>。测试分析结果如表 1 和图 4 所示。

Zr3 样品为正长花岗岩, 采集样品位置坐标为 50°01'57"N, 119°18'03"E。锆石中 20 个分析点中有 16 个位于 U-Pb 谐和线或其附近, 1 个捕获锆石, 其余 3 个分析点明显不谐和, 16 个检测数据的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄保持在 222 ~ 231 Ma 范围之内, 加权平均年龄值是  $(226.7 \pm 1.6)$  Ma, MSWD = 2.2。

Zr4 样品为二长花岗岩, 采样位置坐标为 50°07'12"N, 119°24'14"E。锆石中 20 个分析点中有 17 个位于 U-Pb 谐和线或其附近, 1 个捕获锆

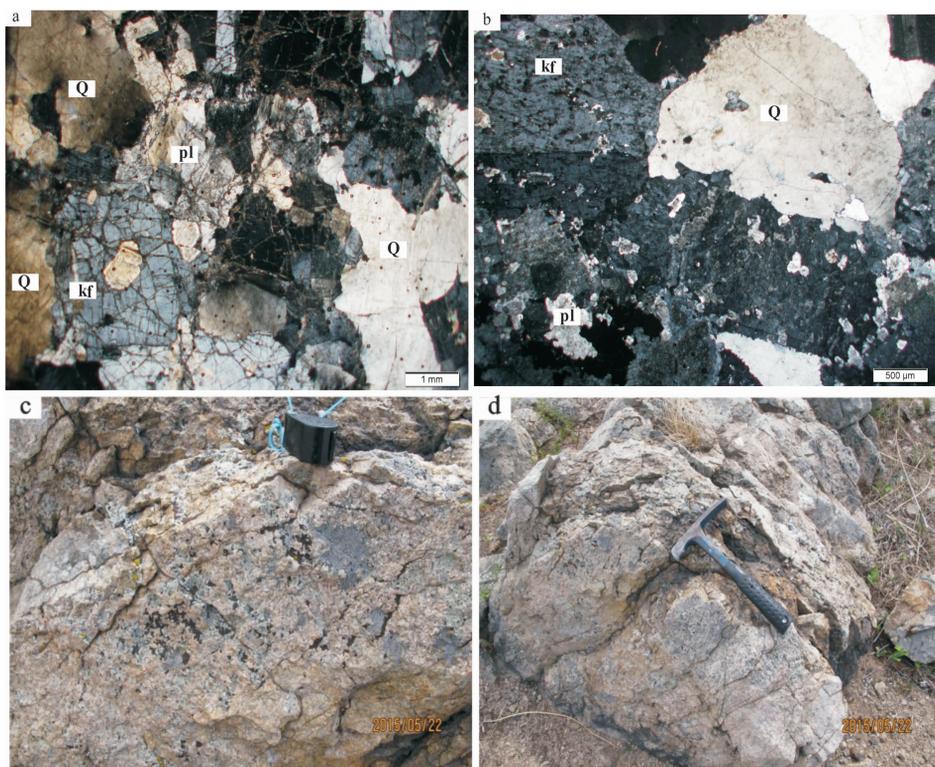


图 2 八大关地区花岗岩野外和显微结构照片(Q. 石英; kf. 钾长石; pl. 斜长石)

Fig. 2 Field and microstructure photographs of granites in Badaguan

a. 二长花岗岩(单偏光); b. 正长花岗岩(单偏光); c. 正长花岗岩野外照片; d. 二长花岗岩野外照片

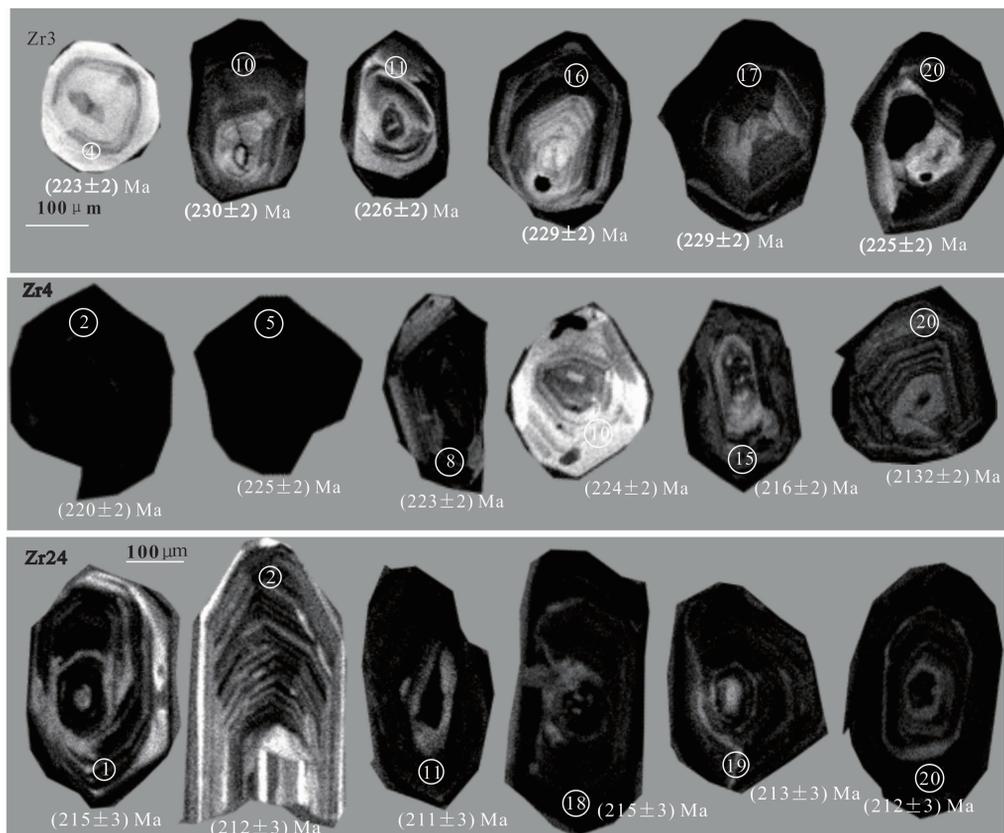


图 3 八大关地区花岗岩中部分锆石 CL 图像和年龄值

Fig. 3 Representative CL images and ages of zircons from granites in Badaguan

表1 八大关地区花岗岩锆石 U-Pb 同位素分析结果  
Table 1 Zircon U-Pb dating results for granites in Badaguan

样品测点	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	
		比值	±1σ	比值	±1σ	比值	±1σ	年龄/Ma	±1σ	年龄/Ma	±1σ
Zr3-01	0.97	0.051 00	0.002 22	0.253 39	0.010 64	0.036 04	0.000 44	229	9	228	3
Zr3-02	0.98	0.052 96	0.001 15	0.257 38	0.005 20	0.035 24	0.000 31	233	4	223	2
Zr3-03	0.80	0.052 90	0.001 10	0.259 09	0.005 02	0.035 52	0.000 30	234	4	225	2
Zr3-04	0.70	0.051 27	0.001 41	0.249 08	0.006 52	0.035 24	0.000 33	226	5	223	2
Zr3-05	0.59	0.050 57	0.004 90	0.254 33	0.024 03	0.036 47	0.000 83	230	19	231	5
Zr3-07	0.75	0.052 84	0.001 96	0.256 38	0.009 15	0.035 19	0.000 39	232	7	223	2
Zr3-09	0.79	0.050 49	0.001 26	0.254 29	0.006 02	0.036 53	0.000 33	230	5	231	2
Zr3-10	0.52	0.051 18	0.001 38	0.256 46	0.006 59	0.036 34	0.000 34	232	5	230	2
Zr3-11	0.66	0.051 97	0.001 63	0.255 76	0.007 66	0.035 69	0.000 36	231	6	226	2
Zr3-12	0.92	0.050 57	0.000 93	0.252 22	0.004 27	0.036 17	0.000 30	228	3	229	2
Zr3-13	0.67	0.051 56	0.001 01	0.258 19	0.004 69	0.036 32	0.000 30	233	4	230	2
Zr3-16	0.62	0.050 92	0.001 30	0.254 07	0.006 13	0.036 18	0.000 33	230	5	229	2
Zr3-17	0.79	0.051 08	0.001 02	0.255 28	0.004 74	0.036 24	0.000 30	231	4	229	2
Zr3-18	0.60	0.050 76	0.001 09	0.251 18	0.005 03	0.035 89	0.000 31	228	4	227	2
Zr3-19	1.11	0.051 50	0.001 27	0.249 19	0.005 81	0.035 09	0.000 32	226	5	222	2
Zr3-20	1.13	0.051 92	0.000 96	0.254 64	0.004 34	0.035 57	0.000 29	230	4	225	2
Zr4-01	0.86	0.050 79	0.000 80	0.249 07	0.003 56	0.035 53	0.000 29	215	5	224	2
Zr4-02	0.50	0.050 49	0.001 06	0.244 99	0.004 81	0.035 16	0.000 31	229	5	220	2
Zr4-03	0.90	0.051 12	0.001 67	0.247 82	0.007 77	0.035 13	0.000 37	226	3	223	2
Zr4-05	0.82	0.052 85	0.002 13	0.258 17	0.010 06	0.035 40	0.000 42	221	3	222	2
Zr4-06	0.83	0.057 19	0.001 99	0.254 76	0.008 51	0.032 29	0.000 36	226	3	225	2
Zr4-07	0.79	0.051 22	0.000 88	0.248 85	0.003 90	0.035 22	0.000 29	222	4	223	2
Zr4-08	0.93	0.052 30	0.001 15	0.252 78	0.005 18	0.035 04	0.000 30	225	6	223	2
Zr4-09	1.25	0.051 43	0.001 31	0.240 67	0.005 79	0.033 93	0.000 31	223	5	226	2
Zr4-12	1.06	0.052 53	0.001 78	0.257 42	0.008 35	0.035 55	0.000 37	226	3	223	2
Zr4-13	0.77	0.050 62	0.002 56	0.234 03	0.011 45	0.033 55	0.000 45	229	4	222	2
Zr4-14	0.91	0.050 82	0.001 46	0.236 36	0.006 45	0.033 75	0.000 32	219	5	215	2
Zr4-15	1.21	0.050 83	0.001 94	0.235 78	0.008 69	0.033 67	0.000 37	225	6	216	2
Zr4-16	0.79	0.050 79	0.000 80	0.249 07	0.003 56	0.035 53	0.000 29	223	7	217	2
Zr4-17	0.63	0.050 49	0.001 06	0.244 99	0.004 81	0.035 16	0.000 31	233	7	225	2
Zr4-18	0.79	0.051 12	0.001 67	0.247 82	0.007 77	0.035 13	0.000 37	214	9	213	3
Zr4-19	0.97	0.050 04	0.001 34	0.245 92	0.006 28	0.035 62	0.000 34	215	5	214	2
Zr4-20	0.80	0.052 85	0.002 13	0.258 17	0.010 06	0.035 40	0.000 42	215	7	213	2
Zr24-01	0.93	0.052 69	0.000 78	0.242 61	0.003 13	0.033 52	0.000 25	223	2	219	2
Zr24-02	0.96	0.058 57	0.001 03	0.279 42	0.004 40	0.034 73	0.000 28	226	4	220	2
Zr24-03	0.80	0.050 79	0.001 00	0.232 43	0.004 21	0.033 33	0.000 27	221	3	213	2
Zr24-05	1.06	0.062 57	0.003 99	0.309 17	0.019 33	0.035 84	0.000 46	212	3	211	2
Zr24-09	0.52	0.051 68	0.001 39	0.235 71	0.006 01	0.033 28	0.000 31	221	5	215	2
Zr24-11	0.85	0.052 39	0.001 43	0.237 71	0.006 16	0.033 13	0.000 31	215	5	211	2
Zr24-12	0.99	0.051 99	0.000 95	0.246 14	0.004 10	0.034 58	0.000 28	208	5	209	2
Zr24-13	0.62	0.064 64	0.001 81	0.318 47	0.008 40	0.035 99	0.000 36	217	5	210	2
Zr24-14	0.92	0.051 82	0.001 10	0.240 81	0.004 74	0.033 96	0.000 29	223	3	219	2
Zr24-16	0.94	0.054 75	0.001 49	0.220 75	0.005 69	0.029 48	0.000 28	219	4	215	2
Zr24-19	0.93	0.052 69	0.000 78	0.242 61	0.003 13	0.033 52	0.000 25	216	4	218	2
Zr24-20	0.96	0.058 57	0.001 03	0.279 42	0.004 40	0.034 73	0.000 28	213	3	216	2

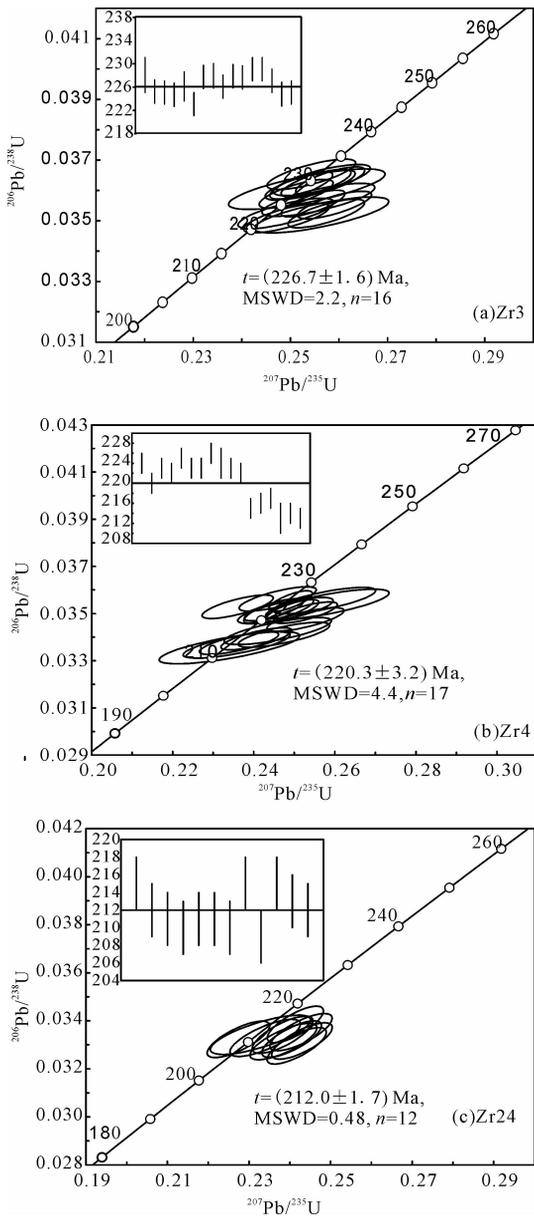


图4 八大关地区花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图  
Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams for granites in Badaguan

石，其余两个分析点明显不谐和，17 个检测数据的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄保持在 213 ~ 226 Ma 范围之内，加权平均年龄值是  $(220.3 \pm 3.2)$  Ma， $\text{MSWD} = 4.4$ 。

Zr24 样品为二长花岗岩，采样位置坐标为  $50^{\circ}08'41''\text{N}$ ， $119^{\circ}23'38''\text{E}$ 。锆石中 20 个分析点中有 12 个位于 U-Pb 谐和线或其附近，1 个捕获锆石，其余 7 个分析点不谐和，12 个测试数据的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄保持在 209 ~ 220 Ma 范围之内，加权平均年龄为  $(212.0 \pm 1.7)$  Ma， $\text{MSWD} = 0.48$ 。

### 3.2 岩石地球化学特征

八大关地区花岗岩主要元素、稀土元素、微量元素分析数据见图 5、表 2—表 4。

#### 3.2.1 主要元素

正长花岗岩中  $w(\text{SiO}_2) = 71.34\% \sim 76.41\%$ ，铝弱过饱和， $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 10.86\% \sim 15.61\%$ ，铝饱和指数  $A/\text{CNK}$  在 1.02 ~ 1.10 之间(图 5(b))，属于弱过铝质岩石；全碱含量较高， $w(\text{K}_2\text{O}) + w(\text{Na}_2\text{O}) = 7.37\% \sim 10.00\%$ ， $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.12 \sim 1.35$ ，相对富钾，过碱指数  $\text{AKI} = 0.87 \sim 0.93$ ，镁钙含量较低， $w(\text{MgO}) = 0.08\% \sim 0.27\%$ ， $w(\text{CaO}) = 0.33\% \sim 0.44\%$ ，大多数花岗岩落入高钾钙碱性系列(图 5(a))，花岗岩分异程度较高， $(\text{DI} = 92.48 \sim 95.80)$ 。二长花岗岩  $w(\text{SiO}_2) = 75.86\% \sim 77.75\%$ ，铝弱过饱和， $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 10.99\% \sim 11.78\%$ ，铝饱和指数  $(A/\text{CNK})$  在 1.01 ~ 1.10 之间(图 5(b))；碱含量  $w(\text{K}_2\text{O}) + w(\text{Na}_2\text{O}) = 6.59\% \sim 8.01\%$ ，过碱指数  $(\text{AKI}) = 0.86 \sim 0.92$ ，

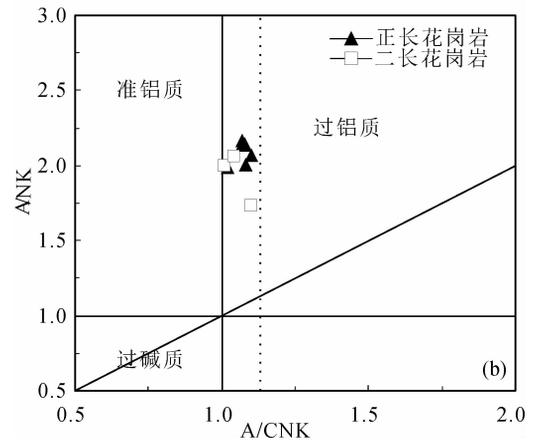
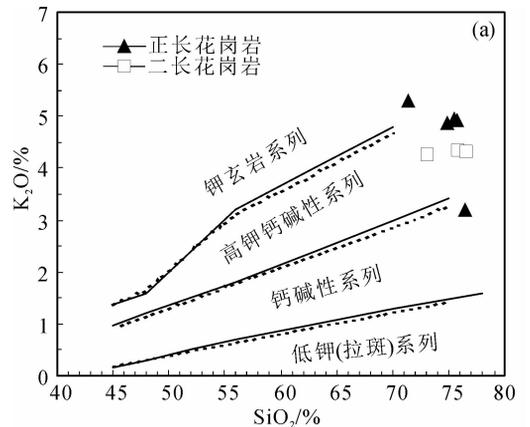


图5 八大关地区花岗岩  $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$  (a) 与  $A/\text{CNK} - A/\text{NK}$  图解 (b) (底图据参考文献 [19])  
Fig. 5 The  $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$  (a) and  $A/\text{CNK} - A/\text{NK}$  diagrams (b) for granites of Badaguan (base map after reference [19])

表2 八大关地区花岗岩主量元素分析测试结果( $w_B/\%$ )Table 2 The compositions of major elements of granites in Badaguan( $\%$ )

采样点号	岩性	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O
20106	正长花岗岩	74.85	0.26	13.33	1.2	0.10	0.03	0.2	0.4	3.87
20118	正长花岗岩	71.34	0.29	15.61	0.96	0.02	0.02	0.13	0.37	4.71
20124	正长花岗岩	75.82	0.26	13.12	0.86	0.12	0.02	0.11	0.35	3.82
20406	正长花岗岩	76.41	0.15	10.86	2.49	0.29	0.03	0.27	0.44	3.39
Zr3	正长花岗岩	75.53	0.15	12.83	1.46	0.22	0.01	0.08	0.33	3.68
Zr4	二长花岗岩	77.75	0.13	10.99	2.55	0.14	0.03	0.31	0.33	3.92
006-2	二长花岗岩	75.86	0.14	11.78	2.12	0.29	0.02	0.27	0.62	3.67
006-6	二长花岗岩	76.64	0.16	11.77	1.73	0.29	0.01	0.28	0.44	3.55
采样点号	岩性	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失量	总量	K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	A/CNK	AKI	Mg <sup>#</sup>
20106	正长花岗岩	4.88	0.04	0.30	100.75	8.75	1.26	1.08	0.88	0.25
20118	正长花岗岩	5.29	0.02	0.22	99.98	10.00	1.12	1.10	0.87	0.22
20124	正长花岗岩	4.92	0.02	0.15	100.56	8.74	1.29	1.07	0.89	0.20
20406	正长花岗岩	3.98	0.05	0.21	101.34	7.37	1.17	1.02	0.92	0.18
Zr3	正长花岗岩	4.95	0.03	0.24	101.19	8.63	1.35	1.07	0.93	0.11
Zr4	二长花岗岩	2.67	0.19	0.17	101.86	6.59	0.68	1.10	0.86	0.22
006-2	二长花岗岩	4.34	0.04	0.35	101.85	8.01	1.18	1.01	0.92	0.21
006-6	二长花岗岩	4.31	0.05	0.21	101.46	5.57	1.21	1.04	0.92	0.24

表3 八大关地区花岗岩稀土元素分析测试结果( $w_B/10^{-6}$ )Table 3 The compositions of rare earth elements of granites in Badaguan( $10^{-6}$ )

采样点号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
20106	正长花岗岩	28.9	57.0	6.96	24.3	4.38	0.85	3.58	0.61	3.47
20118	正长花岗岩	23.6	49.2	5.93	20.5	3.36	0.67	2.72	0.41	2.30
20124	正长花岗岩	52.5	72.1	8.99	32.7	5.93	0.93	4.98	0.86	5.07
20406	正长花岗岩	40.0	71.1	8.01	25.1	3.47	0.79	3.26	0.37	1.83
Zr3	正长花岗岩	29.0	58.1	7.55	25.7	5.05	1.00	4.00	0.64	3.59
Zr4	二长花岗岩	42.1	71.7	8.38	25.9	3.77	0.78	3.58	0.45	2.41
006-2	二长花岗岩	40.7	74.3	8.74	27.4	4.06	0.71	3.61	0.45	2.23
006-6	二长花岗岩	35.7	61.1	7.41	24.8	3.84	0.71	3.18	0.39	1.95
采样点号	岩性	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE
20106	正长花岗岩	0.71	2.17	0.40	2.68	0.39	136.42	122.40	14.02	8.73
20118	正长花岗岩	0.45	1.33	0.23	1.48	0.26	112.37	103.19	9.18	11.24
20124	正长花岗岩	1.02	2.98	0.51	3.34	0.48	193.13	173.88	19.25	9.03
20406	正长花岗岩	0.28	0.98	0.13	0.91	0.15	156.36	148.45	7.91	18.77
Zr3	正长花岗岩	0.69	2.21	0.32	2.32	0.35	140.63	126.53	14.12	8.97
Zr4	二长花岗岩	0.42	1.42	0.22	1.61	0.25	162.89	152.54	10.35	14.74
006-2	二长花岗岩	0.34	1.07	0.12	0.85	0.14	164.75	155.93	8.82	17.68
006-6	二长花岗岩	0.31	1.04	0.14	0.95	0.16	141.66	133.54	8.12	16.44

$w(\text{MgO}) = 0.27\% \sim 0.31\%$ ,  $w(\text{CaO}) = 0.33\% \sim 0.62\%$ , 含量偏低, 全部落入高钾钙碱性系列(图5(a)), 花岗岩分异程度较高( $DI = 93.35 \sim 94.14$ )。二者相比, 正长花岗岩相对于二长花岗岩更富铝和碱, 硅低, 贫钙镁, 但在总体上都具有高硅、钙镁含量低、富碱, 分异指数高的特征,

具有高分异I型花岗岩的特点。

### 3.2.2 稀土元素和微量元素

稀土元素球粒陨石标准化配分图表明, 各样品变化趋势保持一致, 均为轻稀土富集的右倾特征, 指示其为壳源型花岗岩, 稀土总量含量不高,  $\Sigma\text{REE} = 112.37 \times 10^{-6} \sim 193.13 \times 10^{-6}$ , 轻重稀土

表4 八大关地区花岗岩微量元素分析测试结果( $w_B/10^{-6}$ )

Table 4 The compositions of trace elements of granites in Badaguan ( $10^{-6}$ )

采样点号	岩性	Ga	Rb	Ba	Th	U	Nb	Ta	Sr	Zr	Hf	Y
20106	正长花岗岩	14.40	172.0	729	18.5	0.85	9.50	0.90	102.0	168.0	7.50	2.68
20118	正长花岗岩	16.20	138.0	708	14.8	0.67	11.70	0.92	79.1	183.0	8.90	1.48
20124	正长花岗岩	15.40	177.0	656	15.4	0.93	9.61	0.75	81.9	168.0	7.84	3.34
20406	正长花岗岩	12.90	115.0	507	17.6	0.79	7.16	0.68	154.0	49.0	8.22	0.92
Zr3	正长花岗岩	12.70	152.0	454	16.4	1.00	10.70	0.97	78.6	115.0	8.87	2.32
Zr4	二长花岗岩	9.05	58.8	374	12.6	0.78	6.75	0.67	94.1	50.0	7.45	1.61
006-2	二长花岗岩	11.50	127.0	555	26.2	0.71	9.96	0.79	110.0	76.1	8.72	0.85
006-6	二长花岗岩	11.00	107.0	559	22.2	0.71	8.42	0.92	117.0	63.0	9.11	0.95

采样点号	岩性	$\delta Eu$	$(La/Sm)_N$	$(Gd/Yb)_N$	Rb/Sr	Sr/Y	Nb/Ta	Zr/Hf	K/Rb	Th/U	Nd/Th	$t_{Zr}/^{\circ}C$
20106	正长花岗岩	0.65	4.02	1.07	1.69	5.11	10.50	22.50	235	21.7	1.31	730
20118	正长花岗岩	0.66	4.27	1.47	1.74	6.29	12.70	20.60	318	22.1	1.38	736
20124	正长花岗岩	0.51	5.38	1.19	2.16	2.80	12.90	21.40	231	16.5	2.12	717
20406	正长花岗岩	0.71	7.03	2.91	0.75	21.50	10.60	5.96	287	22.4	1.43	648
Zr3	正长花岗岩	0.66	3.49	1.39	1.93	4.21	11.00	13.00	271	16.4	1.58	702
Zr4	二长花岗岩	0.65	6.81	1.82	0.63	7.72	10.10	6.71	377	16.2	2.05	651
006-2	二长花岗岩	0.56	6.09	3.41	1.16	12.60	12.70	8.72	283	37.0	1.04	663
006-6	二长花岗岩	0.61	5.65	2.68	0.92	14.20	9.11	6.92	332	31.3	1.12	657

元素比值较高,  $LREE/HREE = 8.73 \sim 18.77$ , 轻稀土元素的分馏系数  $(La/Sm)_N = 3.49 \sim 7.03$ , 重稀土元素的分馏系数  $(Gd/Yb)_N = 1.07 \sim 3.41$ ,  $LREE$  分馏程度高于  $HREE$ ,  $Eu$  多为中等负异常型 ( $\delta Eu = 0.51 \sim 0.71$ , 图 6(a)), 可能是由于岩浆演化过程中经历了斜长石分离结晶作用。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6(b))上显示, 大离子亲石元素(LILE)  $Rb$ 、 $Th$ 、 $K$  以及轻稀土元素较为富集, 而  $Sr$ 、 $P$ 、 $Ti$  等高场强元素强烈亏损,  $Nb$ 、 $Ta$  相对亏损, 这与东北地区高分异 I 型花岗岩特点相类似<sup>[15,18]</sup>, 具有活动大陆边缘花岗岩特点,  $Rb$ 、 $Ba$ 、 $Sr$  在中酸性岩中广泛分布, 它们常常代替主要元素  $K$ , 以类质同象方式

进入含钾矿物晶格, 比如钾长石和黑云母中。 $Ba$  元素含量相对  $Rb$ 、 $Th$  富集较弱,  $Sr$  的亏损和斜长石、钾长石的分离具有密切联系, 其原因在于花岗岩中的  $Sr$  取代  $Ca$ 、 $Na$  富集于长石中。 $P$  与  $Ti$  所呈现的负异常与磷灰石、榍石分离结晶有关。 $Nb$ 、 $Ta$  相对亏损, 表明岩浆来源于地壳或者受到地壳物质强烈混染, 也可能与源区流体的交代作用有关<sup>[18]</sup>。

### 3.3 锆石 Hf 同位素特征

笔者对测年的 3 个花岗岩样品进行了锆石微区原位  $Lu-Hf$  同位素分析(表 5)。

$Zr3$  样品(正长花岗岩)共分析 11 个点,  $^{176}Hf/^{177}Hf$  比值介于  $0.282766 \sim 0.282902$  之间,

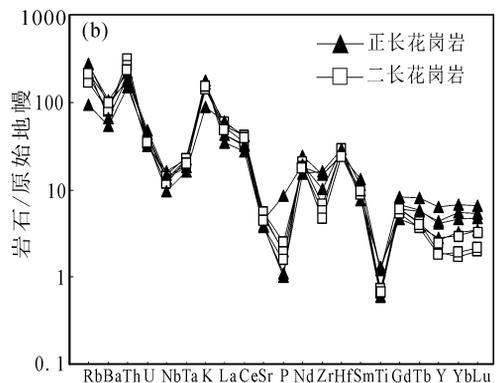
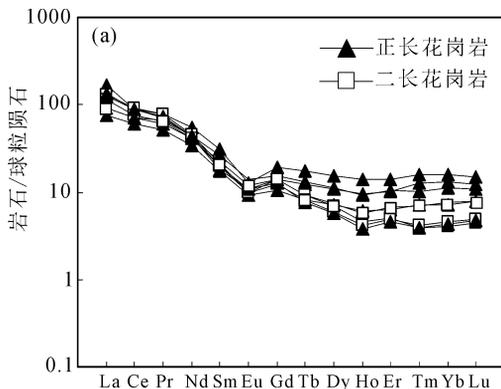


图6 八大关地区花岗岩稀土元素配分模式图(a)<sup>[20]</sup>和微量元素蛛网图(b)<sup>[21]</sup>

Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution pattern and primitive mantle-normalized spidergram of granites in Badaguan

表5 八大关地区花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果  
Table 5 Zircon Hf isotope analysis of granites in Badaguan

样品测点	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\pm 2\sigma$	$T_{\text{DM1(Hf)}/\text{Ma}}$	$T_{\text{DM2(Hf)}/\text{Ma}}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
Zr3-01	0.037 508	0.001 618	0.282 766	0.000 035	4.50	4.50	701	971	-0.95
Zr3-02	0.020 352	0.000 897	0.282 861	0.000 027	7.97	7.97	553	749	-0.97
Zr3-03	0.044 092	0.001 766	0.282 880	0.000 047	8.51	8.51	539	715	-0.95
Zr3-04	0.030 080	0.001 271	0.282 807	0.000 028	6.03	6.03	635	873	-0.96
Zr3-05	0.059 907	0.002 432	0.282 840	0.000 036	7.02	7.02	606	810	-0.93
Zr3-06	0.060 258	0.002 371	0.282 792	0.000 039	5.31	5.31	677	919	-0.93
Zr3-07	0.057 984	0.002 321	0.282 857	0.000 026	7.62	7.62	580	772	-0.93
Zr3-08	0.045 652	0.001 870	0.282 889	0.000 038	8.84	8.84	526	694	-0.94
Zr3-09	0.048 699	0.002 013	0.282 902	0.000 044	9.25	9.25	510	668	-0.94
Zr3-10	0.043 029	0.001 781	0.282 853	0.000 034	7.56	7.56	578	776	-0.95
Zr3-11	0.037 352	0.001 581	0.282 864	0.000 038	7.97	7.97	559	750	-0.95
Zr4-01	0.044 089	0.001 822	0.282 830	0.000 045	6.63	1.58	611	830	-0.95
Zr4-02	0.044 848	0.001 854	0.282 811	0.000 029	5.96	1.03	639	873	-0.94
Zr4-03	0.035 888	0.001 501	0.282 854	0.000 027	7.52	0.95	572	773	-0.95
Zr4-04	0.039 190	0.001 602	0.282 904	0.000 027	9.27	0.95	501	662	-0.95
Zr4-05	0.051 260	0.002 023	0.282 810	0.000 029	5.88	1.04	644	878	-0.94
Zr4-06	0.070 644	0.002 538	0.282 876	0.000 025	8.13	0.89	556	735	-0.92
Zr4-07	0.033 937	0.001 467	0.282 937	0.000 033	10.45	1.18	452	586	-0.96
Zr4-08	0.035 596	0.001 514	0.282 916	0.000 039	9.72	1.39	482	633	-0.95
Zr4-09	0.049 393	0.001 955	0.282 788	0.000 084	5.11	2.98	675	927	-0.94
Zr24-01	0.037 870	0.001 585	0.282 819	0.000 061	6.08	2.17	624	859	-0.95
Zr24-02	0.050 441	0.002 087	0.282 846	0.000 055	6.98	1.93	593	802	-0.94
Zr24-03	0.052 199	0.002 022	0.282 846	0.000 030	6.98	1.05	592	802	-0.94
Zr24-04	0.045 913	0.001 848	0.282 845	0.000 031	7.00	1.08	590	801	-0.94
Zr24-05	0.032 844	0.001 230	0.282 791	0.000 024	5.14	0.86	658	919	-0.96
Zr24-06	0.039 803	0.001 552	0.282 841	0.000 022	6.88	0.77	591	808	-0.95
Zr24-07	0.041 609	0.001 670	0.282 857	0.000 029	7.44	1.03	570	773	-0.95
Zr24-08	0.039 502	0.001 587	0.282 878	0.000 035	8.17	1.24	539	726	-0.95
Zr24-09	0.049 814	0.002 000	0.282 904	0.000 042	9.05	1.47	507	670	-0.94
Zr24-10	0.058 361	0.002 231	0.282 889	0.000 027	8.50	0.95	532	705	-0.93

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  介于 4.50 ~ 9.25 区间, 均值为 7.33, 单阶段模式年龄变化范围介于 510 ~ 701 Ma 之间, 均值为 588 Ma, 二阶段模式年龄变化范围介于 715 ~ 971 Ma 之间, 平均为 791 Ma。

Zr4 样品(二长花岗岩)共分析 9 个点,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值介于 0.282 788 ~ 0.282 937 之间,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  介于 5.11 ~ 10.45 之间, 平均值 7.63, 单阶段模式年龄变化范围为 452 ~ 675 Ma, 平均 570 Ma, 二阶段模式年龄变化范围为 586 ~ 927 Ma, 平均 766 Ma。

Zr24 样品(二长花岗岩)共分析 10 个点,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值介于 0.282 791 ~ 0.282 904 之间,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  介于 5.14 ~ 9.05 之间, 平均值 7.22, 单阶

段模式年龄变化范围为 507 ~ 658 Ma, 平均 579 Ma, 二阶段模式年龄变化范围为 670 ~ 919 Ma, 平均 736 Ma。

## 4 讨论

### 4.1 花岗岩成因类型

本文所研究的花岗岩为正长花岗岩和二长花岗岩, 铝饱和指数介于 1.01 ~ 1.10 之间, 属于弱过铝质花岗岩<sup>[22]</sup>, AKI 值 0.86 ~ 0.93, 低于 A 型花岗岩平均值(0.95)<sup>[23]</sup>, 10 000Ga/Al 值为 1.55 ~ 2.22, 也小于 A 型花岗岩下限值(2.6)。高场强元素  $w(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$  为  $134.42 \times 10^{-6}$  ~  $279.68 \times 10^{-6}$ , 平均为  $197.26 \times 10^{-6}$ , 低于 A 型

花岗岩的  $350 \times 10^{-6}$ 。锆石饱和温度  $t_{Zr} = 648 \sim 736$  °C (均值 683 °C)，低于 A 型花岗岩锆石饱和温度 (一般大于 800 °C)。在成因判别图解上分别落入了 I 型和高分异的 I 型花岗岩区 (图 7)，由此可知，该区花岗岩为高分异 I 型花岗岩。

### 4.2 源区性质

前已叙述，八大关地区花岗岩 Eu 多为中等负异常，因为 Eu 通常有  $Eu^{3+}$  和  $Eu^{2+}$  两种价态，而  $Eu^{2+}$  可以呈类质同象取代斜长石中的  $Ca^{2+}$ ，且 Eu 在斜长石中的分配系数远远大于其他 REE，因此 Eu 负异常通常指示岩浆在演化过程中斜长石分离结晶或源区有斜长石残留，但该区花岗岩 Rb/Ba、Rb/Sr 比值与  $\delta Eu$  之间存在明显的负相关性 (图 8 (a)、(b))，表明八大关地区花岗岩的负 Eu 异常为后期斜长石分离结晶而非源区斜长石残留所致。

研究区花岗岩锆石的  $^{176}Hf/^{177}Hf$  比值均较高，为 0.282 766 ~ 0.282 937。正长花岗岩和二长花岗岩  $\epsilon_{Hf}(t)$  均为正值 (4.50 ~ 10.45)，两种花岗岩在  $t-\epsilon_{Hf}(t)$  图解上均落入球粒陨石演化线之上并且比较集中 (图 8(c))，其二阶段 Hf 模式年龄较为年轻，为新元古代 (0.59 ~ 0.97 Ga)。

当岩石具有正的  $\epsilon_{Hf}(t)$  值时，其源区物质多来自于亏损地幔或是从亏损地幔新增生的年轻地壳，而负的  $\epsilon_{Hf}(t)$  值则表明岩石主要来自于古老地壳的再熔融或是岩浆形成、运移过程中受到了古老地壳的混染<sup>[26-29]</sup>。该区花岗岩  $\epsilon_{Hf}(t)$  皆呈正值，与兴蒙造山带大面积出露的显生宙花岗岩的  $\epsilon_{Hf}(t)$  值一致<sup>[17,28-31]</sup>，说明岩浆来源于相似的岩浆源区。结合前文地球化学分析结果，两种花岗岩微量元素特征相似，均较富硅，铝弱过饱和，富集大离子亲石元素和亏损高场强元素，暗示该区花岗岩岩浆应为壳源岩浆。八大关地区花岗岩的锆石 Hf 二阶段模式年龄集中在 0.59 ~ 0.97 Ga，所以其岩浆应该来源于新元古代期间从亏损地幔新增生的基性地壳物质的部分熔融。

### 4.3 构造环境

地球化学分析结果显示，研究区晚三叠世花岗岩具有活动大陆边缘 I 型花岗岩特点，在 (Y + Nb) - Rb 和 (Yb + Ta) - Rb 图解中花岗岩全部落入火山弧区 (图 9)，反映花岗岩形成于与俯冲有关的构造背景，那么这种俯冲的背景是与南部的古亚洲洋有关，还是北部的蒙古-鄂霍茨克洋的

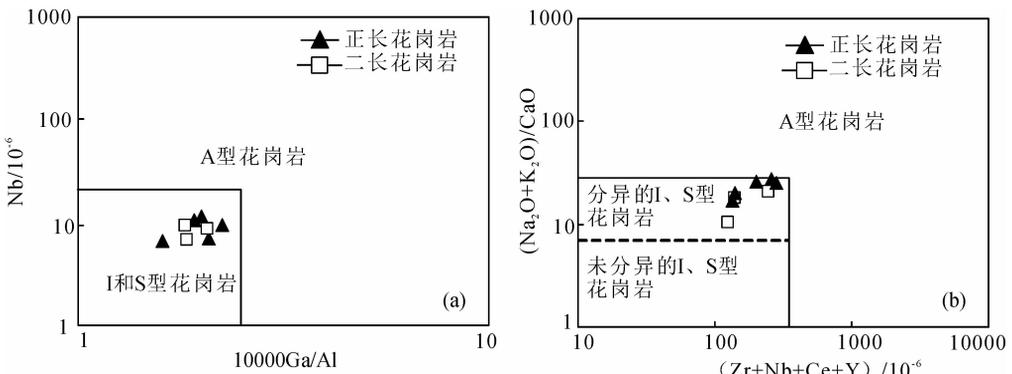


图 7 八大关地区花岗岩成因类型判别图解(底图据参考文献[23])

Fig. 7 Discrimination diagrams of genetic types for granites of Badaguan

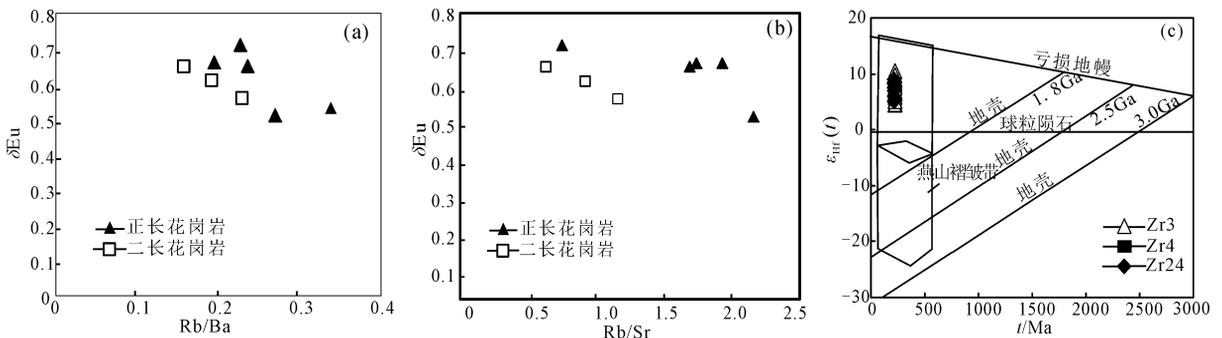


图 8 八大关地区花岗岩 Rb/Ba -  $\delta Eu$  (a)、Rb/Sr -  $\delta Eu$  (b)、 $\epsilon_{Hf}(t) - t$  (c) 相关图(底图据参考文献[24-25])

Fig. 8 The Rb/Ba- $\delta Eu$  (a), Rb/Sr- $\delta Eu$  (b), and  $\epsilon_{Hf}(t) - t$  (c) relationship diagrams for granites of Badaguan

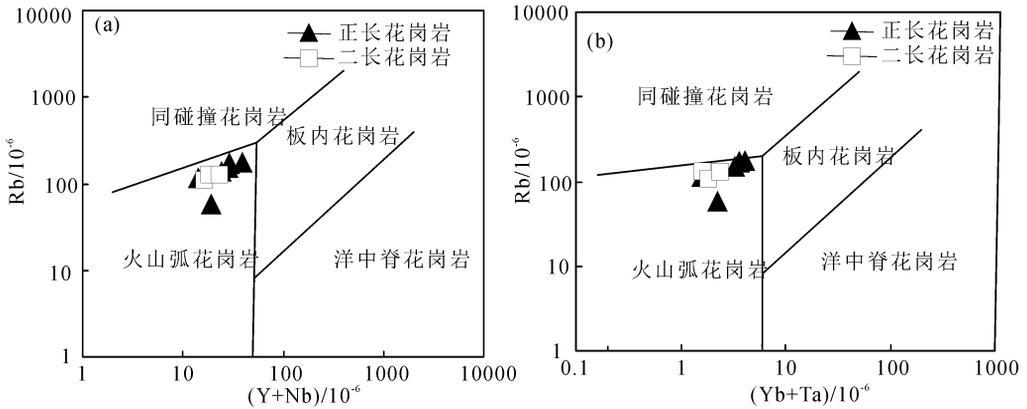


图9 八大关地区花岗岩构造环境判别图解(据 Pearce 等<sup>[37]</sup>, 1984)

Fig. 9 Tectonic setting for granites of Badaguan (after Pearce et al. <sup>[37]</sup>, 1984)

俯冲有关呢?

近年来研究表明,古亚洲洋最后在二叠纪末期—早三叠世闭合,沿西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带消失,随后进入了伸展阶段<sup>[32-33]</sup>。研究区花岗岩的形成时代为晚三叠世,与古亚洲洋闭合时间相差甚远,并且在额尔古纳地块发现的太平川斑岩型铜铅矿床和八大关斑岩型铜铅矿床皆产生于蒙古—鄂霍茨克洋向额尔古纳地块方向进行俯冲活动大陆边缘环境,成矿岩体的年龄为202~229 Ma<sup>[15-16, 34-36]</sup>。位于蒙古国额尔登特的大规模斑岩型铜铅矿床容矿岩体形成于岛弧作用,形成时代为240 Ma,与蒙古—鄂霍茨克洋的俯冲有关<sup>[16]</sup>。基于以上分析结果和区域演化史,说明蒙古—鄂霍茨克洋三叠纪具有向南东方向的俯冲作用。因此,研究区的晚三叠世花岗岩应形成于蒙古—鄂霍茨克洋板块俯冲的活动大陆边缘环境。

## 5 结论

通过对内蒙古海拉尔北部八大关花岗岩的岩石学特征、地球化学特征及成岩时代的研究,得出以下主要结论。

(1)八大关地区花岗岩以正长花岗岩和二长花岗岩为主,属于高分异I型。

(2)八大关地区正长花岗岩和二长花岗岩形成于(212±1.7)~(226.7±1.6) Ma的印支期,并非前人认为的燕山期。

(3)八大关地区正长花岗岩和二长花岗岩的岩浆源区均为新元古代增生的基性地壳物质,岩浆形成于蒙古—鄂霍茨克洋板块俯冲的活动大陆边缘环境。

## 参考文献:

- [1] KUZMIN M L, ABRAMOVICH G Y, DRIL S L, et al. The Mongolian-Okhotsk suture as the evidence of Late Paleozoic-Mesozoic collisional processes in Central Asia [J]. Abstract of 30th IGC, 1996, 1: 261.
- [2] ZHAO X X, COE R S. Paleomagnetic constraints on the paleogeography of China: Implications for Gondwanaland [J]. Abstract of 30th IGC, 1996, 1: 231.
- [3] LI J Y. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian ocean and subduction of the Paleo-pacific plate [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 26: 207-224.
- [4] MENG E, XU W L, PEI F P, et al. Chronology of Late Paleozoic volcanism in eastern southeastern margin of Jiamusi massif and its tectonic implications [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53 (8): 1231-1245.
- [5] MENG E, XU W L, PEI F P, et al. Detrital-zircon geochronology of Late Paleozoic sedimentary rocks in eastern Heilongjiang province, NE China: Implications for the tectonic evolution of the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt [J]. Tectonophysics, 2010, 485: 42-51.
- [6] 葛文春, 林强, 李献华, 等. 大兴安岭北部伊列克得组玄武岩的地球化学特征 [J]. 矿物岩石, 2000, 10(3): 14-18.
- [7] 葛文春, 林强, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(2): 172-178.
- [8] 葛文春, 李献华, 林强, 等. 呼伦湖早白垩世碱性流纹岩的地球化学特征及其意义 [J]. 地质科学, 2001, 36(2): 176-183.
- [9] 林强, 葛文春, 曹林, 等. 大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征 [J]. 地球化学, 2003, 32(3): 208-222.
- [10] WANG F, ZHOU X H, ZHANG L C, et al. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 251: 179-198.

- [11] XU W L, JI W Q, PEI F P, et al. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin Provinces, NE China: Chronology, geochemistry, and tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34: 392–402.
- [12] WU F Y, SUN D Y, GE W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41: 1–30.
- [13] 许文良, 葛文春, 裴福萍, 等. 东北地区中生代火山作用的年代学格架及其构造意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(增刊): 286–287.
- [14] MENG Q R. What drove Late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? [J]. *Tectonophysics*, 2003, 369(3/4): 155–174.
- [15] WU F Y, JAHN B M, WILDE S A, et al. Highly fractionated I-type granites in NE China(1): Geochronology and petrogenesis [J]. *Lithos*, 2003, 66: 241–273.
- [16] 江思宏, 聂凤军, 苏永江, 等. 蒙古国额尔登特大型铜-钼矿床年代学与成因研究 [J]. *地球学报*, 2010, 31(3): 289–306.
- [17] 陈志广, 张连昌, 卢百志, 等. 内蒙古太平川铜钼矿成矿斑岩时代地球化学及地质意义 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(5): 1437–1449.
- [18] 吕长禄, 徐东海, 李新鹏, 等. 黑龙江太平岭早侏罗世花岗岩成因及壳幔混合作用 [J]. *现代地质*, 2012, 26(4): 634–646.
- [19] RICHWOOD P C. Boundary lines with petrologic diagrams which use oxides major and minor element [J]. *Lithos*, 1989, 22: 247–263.
- [20] BOYNTON W V. Geochemistry of the rare earth elements; meteorite studies [M] // HENDERSON P. *Rare Earth Element Geochemistry. Developments in Geochemistry*. Amsterdam, New York: Elsevier, 1984: 63–114.
- [21] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes [M] // SAUNDER A D, NORRIS M J. *Magma-tism in Ocean Basins*. London: Geological Society, 1989: 313–345.
- [22] BELOUSOVA E A, O'REILLY W G, GRIFFIN W L, et al. Igneous zircon; trace-element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143: 602–622.
- [23] WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95: 407–419.
- [24] 曹康, 许继峰, 陈建林, 等. 云南普朗大型斑岩型铜矿含矿斑岩成因及其成矿意义 [J]. *矿床地质*, 2014, 33(2): 307–322.
- [25] YANG J H, WU F Y, SHAO J A, et al. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan fold and thrust belt, North China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 246: 336–352.
- [26] 杨帆, 肖荣阁, 李娜, 等. 内蒙古宝音图钼矿床花岗岩稀土元素地球化学特征及花岗岩成因 [J]. *现代地质*, 2013, 27(4): 831–840.
- [27] 武鹏飞, 孙德有, 王天豪, 等. 延边和龙地区闪长岩的年代学、地球化学特征及岩石成因研究 [J]. *高校地质学报*, 2013, 19(4): 600–610.
- [28] 李蓉, 孙德有, 苟军, 等. 张广才岭北部苇河花岗岩基的地球化学特征与岩石成因 [J]. *世界地质*, 2012, 31(3): 462–470.
- [29] 敬海鑫, 孙德有, 苟军, 等. 兴凯地块南部花岗岩年代学、地球化学及 Hf 同位素特征 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2015, 40(6): 982–994.
- [30] 唐杰, 许文良, 王枫, 等. 张广才岭帽儿山组双峰式火山岩成因: 年代学与地球化学证据 [J]. *世界地质*, 2011, 30(4): 508–520.
- [31] 徐美君, 许文良, 王枫, 等. 小兴安岭中部早侏罗世花岗岩质岩石的年代学与地球化学及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 354–368.
- [32] 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等. 西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2004, 34(2): 174–181.
- [33] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217–1238.
- [34] 余宏全, 李进文, 向安平, 等. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(2): 571–594.
- [35] 曾维顺, 周建波, 董策, 等. 蒙古—鄂霍茨克洋俯冲的记录: 额尔古纳地区八大关变质杂岩的证据 [J]. *岩石学报*, 2014, 30(6): 1948–1960.
- [36] 侯召硕. 内蒙古额尔古纳地区八大关铜钼矿床成因与构造背景 [D]. 长春: 吉林大学, 2014: 42–45.
- [37] PEARCE J A, HARRIS N B L, TINDLE A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25: 956–983.