

文章编号: 1004 — 5589 (2018) 01 — 0009 — 12

大兴安岭北段—脑丸地区花岗斑岩锆石 U-Pb 年代学 及地球化学特征

孟庆鹏, 孙丰月, 李良

吉林大学 地球科学学院, 长春 130061

摘要: 大兴安岭北段—脑丸地区花岗斑岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征研究结果表明该岩石的加权平均年龄为 140.5 ± 2.4 Ma, 属早白垩世, 同时含有较多中—晚三叠世的捕获锆石 (223 ~ 232 Ma)。岩石的 SiO_2 含量为 63.73% ~ 64.35%, ($\text{K}_2\text{O} + \text{N}_2\text{O}$) 为 6.77% ~ 7.31%, Al_2O_3 含量为 15.20% ~ 15.40%, MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 值分别为 1.85% ~ 2.01% 和 32 ~ 34, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 值为 1.37 ~ 1.53, 铝饱和指数 (A/CNK 值) 为 0.94 ~ 0.96 之间, 属于高钾钙碱性系列、准铝质 I 型花岗岩岩石。岩石的稀土总量相对较低 ($\sum \text{REE} = 110.37 \times 10^{-6} \sim 117.55 \times 10^{-6}$), 轻重稀土元素分馏较高 ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 22.39 \sim 31.72$), Eu 异常不明显 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.91 \sim 1.07$), 富集轻稀土元素和 Rb、K 等大离子亲石元素, 相对亏损重稀土元素和 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素, 高 Sr ($515 \times 10^{-6} \sim 665 \times 10^{-6}$), 低 Y ($6.73 \times 10^{-6} \sim 7.39 \times 10^{-6}$), 具有埃达克岩性质。结合区域构造演化特征, 认为该花岗斑岩起源于增厚下地壳部分熔融, 应与蒙古—鄂霍茨克洋闭合后的陆陆碰撞造山作用有关。

关键词: 大兴安岭; 一脑丸地区; 早白垩世; 花岗斑岩; 埃达克岩; U-Pb 年代学

中图分类号: P597; P595 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1004-5589.2018.01.002

Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of granite porphyry in Yinaowan region of northern Great Xing'an Range

MENG Qing-peng, SUN Feng-yue, LI Liang

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

Abstract: Zircon U-Pb geochronology and geochemical data for the granite porphyry in Yinaowan region of northern Great Xing'an Range has been studied, the results show that the weighted mean age of the rock was 140.5 ± 2.4 Ma, belonging to Early Cretaceous, with captured zircons of Middle-Late Triassic (223 ~ 232 Ma) in the samples. Petrogeochemically, SiO_2 contents is 63.73% ~ 64.35%, ($\text{K}_2\text{O} + \text{N}_2\text{O}$) is 6.77% ~ 7.31%, Al_2O_3 contents is 15.20% ~ 15.40%, MgO and $\text{Mg}^\#$ are of 1.85% ~ 2.01% and 32 ~ 34, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ is 1.37 ~ 1.53, and aluminum saturation index (A/CNK) is 0.94 ~ 0.96, respectively, belonging to high-K calc-alkaline volcanic rock series, quasi-aluminous rock and I-type granite. The total amount of rare earths is relatively low ($\sum \text{REE} = 110.37 \times 10^{-6} \sim 117.55 \times 10^{-6}$), fraction of light and heavy rare earth elements is high ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 22.39 \sim 31.72$), Eu anomaly is not obvious ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.91 \sim 1.07$). The samples are also enriched in light

收稿日期: 2017-06-20; 改回日期: 2018-01-08

基金项目: 黑龙江省新林区小柯勒河铜(钼)矿区及外围成矿规律与找矿潜力研究(黑国土科技201605)。

通讯作者: 孙丰月(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事热液矿床成矿理论与预测、区域成矿作用研究. E-mail: sunfeng0669@sina.com

rare earth elements and large ion elements (Rb, K), depleted in heavy earth elements and high field strength elements (Nb, Ta, Ti, P). High Sr content ($515 \times 10^{-6} \sim 665 \times 10^{-6}$) and low Y content ($6.73 \times 10^{-6} \sim 7.39 \times 10^{-6}$) indicate the character of adakite. Combined with regional tectonic, it is suggested that the granite porphyry was originated from the partial melting of the thickened lower crust, and was related to continental collision orogeny after the closing of Mongolia–Okhotsk Ocean.

Key words: Great Xing'an Range; Yinaowan region; Early Cretaceous; granite porphyry; adakite; U–Pb geochronology

0 引言

埃达克岩自20世纪90年代被Defant和Drummond^[1]提出以来,一直受到国内外地质学者的关注^[2-7]。随着研究的深入,埃达克岩这一术语已发生了较大的扩展,现指具有特定地球化学性质的中酸性火成岩: $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$, MgO 通常 $< 3\%$ (很少 $> 6\%$), 高 Sr (很少 $< 400 \times 10^{-6}$), 低 Y ($< 18 \times 10^{-6}$), 亏损重稀土元素和高场强元素 (Nb、Ta、Ti、P), 无或微弱 Eu 异常, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 < 0.7040 , 主要矿物组合为斜长石 + 普通角闪石, 可出现黑云母、辉石和不透明矿物。埃达克岩最初成因解释为年轻的板片 ($< 25 \text{ Ma}$) 发生小角度的俯冲^[8,9]、在 $80 \text{ km} \pm$ 发生部分熔融所形成, 残留物为含石榴子石的岩石, 如榴辉岩等。但是, 近年来随着对埃达克岩更深层次的研究, 发现埃达克岩不只形成于年轻洋板片直接熔融的俯冲环境, 还可以形成于加厚下地壳的底部^[10]。

大兴安岭地区位于兴蒙造山带东部, 自前寒武纪基底形成以来, 本地区的构造活动一直十分强烈。从古生代自西向东额尔古纳地块、兴安地块和松嫩地块的相继拼合, 形成兴蒙造山带的主体, 到古生代晚期兴蒙造山带南段西伯利亚板块与华北地块碰撞拼合^[11], 再到中生代蒙古—鄂霍茨克洋碰撞闭合挤压造山, 之后发生伸展作用形成裂陷盆地, 同时还存在着强烈的岩浆活动, 尤其是早白垩世早期 (145 ~ 120 Ma) 是东北地区火山活动最为强烈时期, 形成了大量中酸性火山岩, 另有少量侵入岩在本地区分布^[12,13]。但是, 对于蒙古—鄂霍茨克洋的闭合时间, 学界一直有着不同的争论, 是早—中侏罗世^[14] 还是晚侏罗世—早白垩世早期^[15]? 这一问题的解决直接关系到研究区岩石的成因, 并且对找矿也具有十分重要的意义。因此, 本文对大兴安岭北段—脑丸地区花岗斑岩进行锆石 U–Pb 年

代学及岩石地球化学特征分析, 以探讨该岩石的形成原因及地球动力学背景。

1 地质背景与样品特征

—脑丸地区位于黑龙江省大兴安岭地区呼玛县东南部, 属呼玛县三道卡乡管辖。大地构造位置位于兴安地块内, 处于 NW 与 NE 向两组大断裂交汇的部位。区内地层主要为古生界, 岩性主要为安山质的火山岩和火山碎屑岩。另外, 晚元古界—早寒武系 (以变质岩为主)、中生界 (以沉积岩、中酸性火山岩为主) 和新生代地层有零星出露 (图 1)。侵入岩主要有两期: ①晚元古代—早寒武系纪的花岗闪长岩、英云闪长岩和二长花岗岩; ②早白垩世的闪长岩、花岗斑岩。其中, 花岗斑岩岩体侵入到上元古界—下寒武统片岩和砂岩中。本地区构造活动较为强烈, 三卡—卧都河北西向大断裂穿过本区, 受其影响, NE 向、NW 向、EW 向及 NS 向次级构造很发育。围岩蚀变强烈, 主要有硅化、钾化、绢英岩化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化与高岭土化等, 且具有较明显的中心式蚀变分带特征, 围绕斑岩体呈同心圆状或椭圆状产出, 且已发现多数铜、金矿化位于花岗斑岩或其边部的蚀变带当中, 说明该矿化与花岗斑岩有着一定的成因联系。

花岗斑岩: 岩石风化面呈土黄色, 新鲜面灰色, 斑状结构, 基质为隐晶质结构, 块状构造。岩石由斑晶 15%, 基质 85% 组成。斑晶由斜长石 5%、钾长石 5%、石英 5% 及少许黑云母组成。斜长石呈灰白色, 半自形板状, 大小 0.2 ~ 2 mm; 钾长石, 肉红色, 他形粒状, 大小 0.5 ~ 1.8 mm; 石英, 无色透明, 他形粒状, 大小 0.1 ~ 1.5 mm; 黑云母, 黑色, 半自形片状, 大小 0.5 ~ 2 mm, 基质为隐晶质 (图 2)。

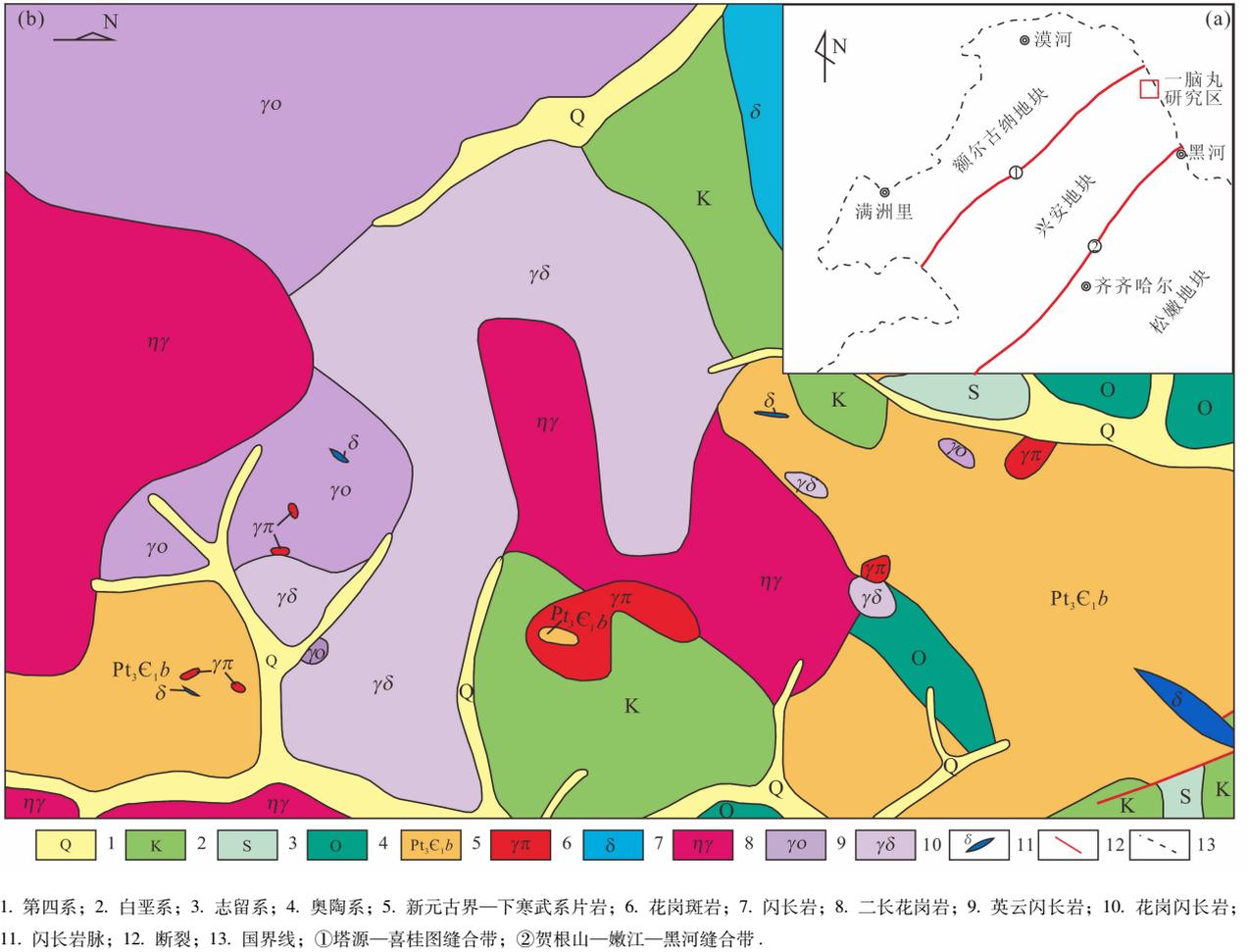


图 1 东北地区北部大地构造图^[16] (a) 和一脑丸地区地质简图 (b)

Fig. 1 Geotectonic map of northern Northeast China (a) and simplified geological map of Yinaowan area

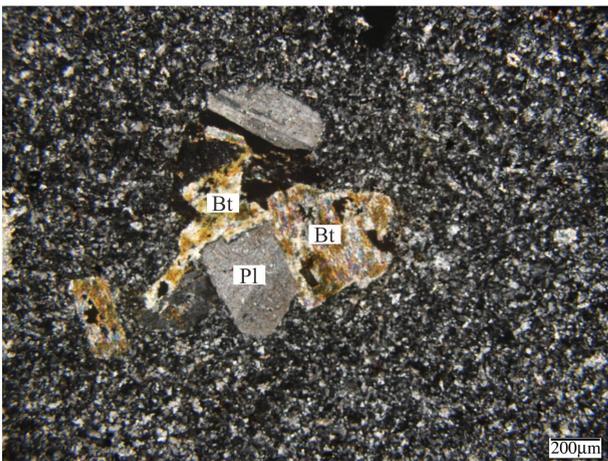


图 2 一脑丸地区花岗斑岩显微镜下照片

Fig. 2 Microphotographs of granite porphyry in Yinaowan region

2 分析方法

锆石挑选由河北省廊坊市宏信地质勘查技术服务有限公司利用标准重矿物分离技术分选完成。经过双目镜下仔细挑选,将不同特征的锆石粘在双面胶上,并用无色透明的环氧树脂固定;待其固化之后,将表面抛光至锆石中心。在测试前,通过反射光和 CL 图像仔细研究锆石的晶体形态与内部结构特征,以选择最佳测试点。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。激光剥蚀使用德国相干公司 (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 32 μm ,激光能量密度 10 J/cm^2 ,剥蚀频率 8 Hz。使用标准锆石 91500 (1 062 Ma) 作为外标进行同位素比值校正,标准锆石 PLE/GJ-1/Qing Hu 为监控盲样。元素含量以国际标样 NIST610 为外标, Si 为内标元素进行计算, NIST612 和 NIST614 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。谐和

年龄及图像使用 Isoplot/Ex (3.0) 给出^[17]。分析数据及锆石 U-Pb 谐和图给出误差为 1σ , 表示 95% 的置信度。

主量元素和微量元素分析由核工业北京地质研究院分析测试中心完成。主量元素的测定采用 X 射线荧光光谱法 (XRF), 实验仪器为荷兰 FHLISP 公司 PW2404 顺序扫描型 X 射线荧光光谱仪。微量和稀土元素测定采用德国 Finnigan_MAT 公司生产 ELEMENT I 电感耦合等离子体质谱仪测得。对于质量分数 $>20 \mu\text{g}/\text{g}$ 的元素, 误差为 $\pm 5\%$, 而对于质量分数 $<20 \mu\text{g}/\text{g}$ 的元素, 误差为 $\pm 10\%$ 。

3 分析结果

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

阴极发光 (CL) 图像显示 (图 3), 锆石多为自形、半自形, 呈短柱状、粒状, 并发育有清晰的振荡生长环带, 有着较高的 Th/U 比值 (0.43 ~ 1.67), 具有岩浆锆石特征^[18,19]。LA-ICP-MS 测试结果如表 1 所示。

表 1 一脑丸地区花岗斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data for granite porphyry in Yinaowan region

样品编号	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值 $\pm 1\sigma$						年龄/Ma $\pm 1\sigma$					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$						
YNW-ZK100-1-N1-05	1 328	2 413	0.55	0.050 4	0.000 9	0.250 5	0.005 3	0.036 2	0.000 5	213	44	227	4	229	3
YNW-ZK100-1-N1-09	3 552	2 121	1.67	0.052 3	0.001 6	0.262 8	0.009 0	0.036 6	0.000 9	298	70	237	7	232	6
YNW-ZK100-1-N1-10	534	979	0.54	0.051 9	0.001 6	0.259 1	0.009 1	0.036 5	0.000 9	280	70	234	7	231	5
YNW-ZK100-1-N1-11	2 952	3 565	0.83	0.050 1	0.000 8	0.250 5	0.004 7	0.036 4	0.000 6	198	34	227	4	231	3
YNW-ZK100-1-N1-19	1957	3 060	0.64	0.048 8	0.003 1	0.241 1	0.015 6	0.035 7	0.000 6	139	141	219	13	226	4
YNW-ZK100-1-N1-20	494	986	0.5	0.045 2	0.001 4	0.226 6	0.007 7	0.036 2	0.000 6	242	35	207	6	229	3
YNW-ZK100-1-N1-22	1 4043	17 014	0.83	0.050 8	0.000 6	0.255 5	0.003 5	0.036 4	0.000 4	228	21	231	3	231	2
YNW-ZK100-1-N1-23	1 682	3 014	0.56	0.053 4	0.001 2	0.268 4	0.008 7	0.036 5	0.001 0	346	49	241	7	231	6
YNW-ZK100-1-N1-24	3 142	5 797	0.54	0.055 6	0.000 5	0.271 3	0.012 0	0.035 3	0.001 4	439	19	244	10	223	9
YNW-ZK100-1-N1-25	1 183	2 154	0.55	0.051 7	0.001 1	0.259 9	0.006 5	0.036 5	0.000 6	272	42	235	5	231	4
YNW-ZK100-1-N1-02	977	2 290	0.43	0.052 3	0.001 0	0.264 7	0.011 0	0.036 3	0.001 3	302	43	238	9	230	8
YNW-ZK100-1-N1-06	1 298	1 524	0.85	0.049 3	0.001 3	0.246 4	0.007 4	0.036 4	0.000 7	165	66	224	6	230	4
YNW-ZK100-1-N1-07	1 258	1 192	1.06	0.051 1	0.004 0	0.254 1	0.017 1	0.036 5	0.001 6	243	180	230	14	231	10
YNW-ZK100-1-N1-01	593	2 104	0.28	0.049 7	0.003 0	0.149 5	0.009 8	0.021 8	0.000 5	189	143	141	9	139	3
YNW-ZK100-1-N1-03	483	1 073	0.45	0.050 1	0.001 8	0.154 0	0.006 7	0.022 2	0.000 6	198	81	145	6	141	4
YNW-ZK100-1-N1-04	439	1 193	0.37	0.054 6	0.003 9	0.163 5	0.011 4	0.021 8	0.000 6	394	159	154	10	139	4
YNW-ZK100-1-N1-08	466	2 217	0.21	0.050 2	0.001 2	0.152 4	0.004 2	0.022 1	0.000 4	206	54	144	4	141	3
YNW-ZK100-1-N1-13	278	3 792	0.07	0.050 0	0.001 3	0.151 5	0.004 5	0.022 1	0.000 6	195	27	143	4	141	4
YNW-ZK100-1-N1-15	728	7 938	0.09	0.051 4	0.000 8	0.156 7	0.003 3	0.022 1	0.000 4	257	40	148	3	141	2

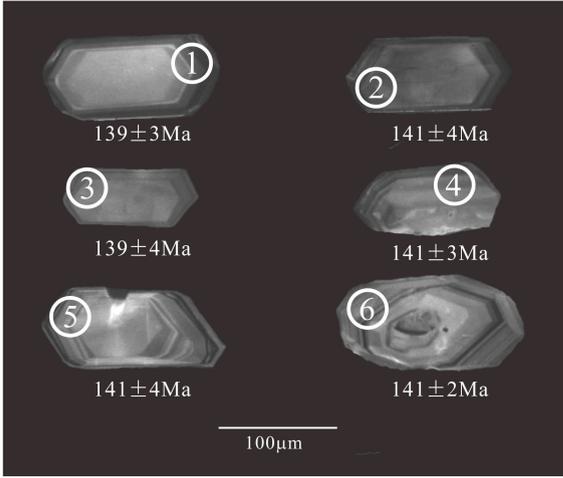


图 3 一脑丸地区花岗斑岩锆石阴极发光 (CL) 图像
Fig. 3 CL image of selectend zircons from granite porphyry in Yinaowan region

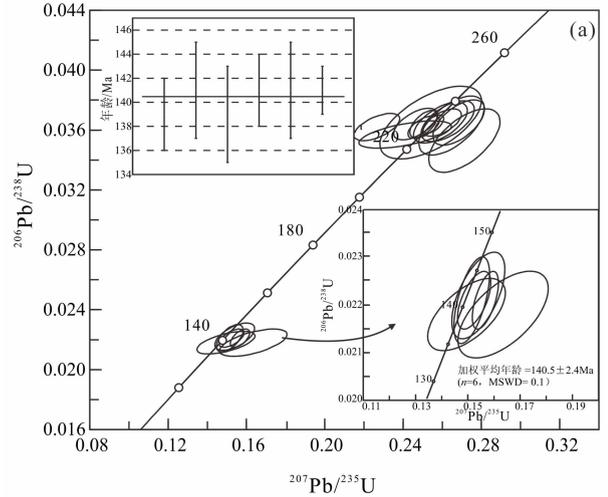


图 4 一脑丸地区花岗斑岩锆石 U-Pb 谐和图
Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram of granite porphyry in Yinaowan region

该岩石样品的 19 个测试点基本落在谐和线上及其附近 (图 4a), 其中 13 个测试颗粒的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较老 (226 ~ 232 Ma), 代表捕获锆石年龄, 为蒙古—鄂霍茨克洋板块向南俯冲的岩浆记录^[20,21]。其余的 6 个测试颗粒的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布在 139 ~ 141 Ma 之间, 加权平均年龄为 $140.5 \pm 2.4 \text{ Ma}$ ($n=6$, $\text{MSWD}=0.1$), 代表此岩石样品的形成年龄 (图 4b)。

3.1 岩石地球化学特征

3.1.1 主量元素

花岗斑岩的 SiO_2 含量为 63.73% ~ 64.35%,

$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 为 6.77% ~ 7.31%, Al_2O_3 为 15.20% ~ 15.40%, TFe_2O_3 含量为 7.67% ~ 7.85%, MgO 为 1.85% ~ 2.01%, $\text{Mg}^\#$ 值为 32.02 ~ 34.16 (表 2)。所有样品在 TAS 图解中均落入亚碱性的花岗闪长岩范围内 (图 5a), 在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解显示其具有高钾钙碱性系列特征 (图 5b), 另外, 铝饱和指数 (A/CNK 值) 介于 0.94 ~ 0.96 之间, 为准铝质岩石 (图 5c), 且 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO} = 1.37 \sim 1.53$, 在 A/NK - A/CNK 图解 (图 5c) 中落于 I-S 线左侧 (A/CNK < 1.1), 应为 I 型花岗岩^[22,23]。

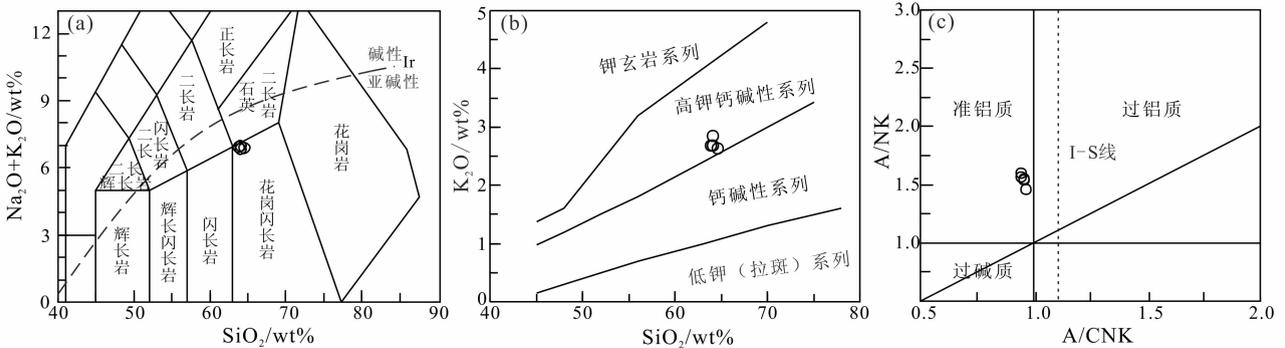


图 5 一脑丸地区花岗斑岩 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) - SiO_2 (a)、 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ (b) 和 A/NK - A/CNK (c) 图解

Fig. 5 Plots of ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) - SiO_2 (TAS) (a), $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ (b) and A/NK - A/CNK (c) for granite porphyry in Yinaowan region

表2 一脑丸地区花岗斑岩主量元素 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果Table 2 Major ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) datas for granite porphyry in Yinaowan area

样品号	YNW-ZK100-1-Y1-1	YNW-ZK100-1-Y1-2	YNW-ZK100-1-Y1-3	YNW-ZK100-1-Y1-4	YNW-ZK100-1-Y1-5
SiO ₂	64.15	63.89	64.35	63.73	64.32
Al ₂ O ₃	15.29	15.40	15.32	15.20	15.39
TFe ₂ O ₃	7.85	7.67	7.74	7.78	7.78
FeO	3.13	2.91	3.06	3.13	2.99
MgO	2.01	2.01	1.90	1.85	1.94
CaO	3.39	3.62	3.02	3.65	3.40
Na ₂ O	4.25	4.23	4.59	3.94	4.30
K ₂ O	2.69	2.68	2.72	2.83	2.69
MnO	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13
TiO ₂	0.53	0.54	0.53	0.53	0.53
P ₂ O ₅	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
LOI	3.03	2.88	2.88	3.63	2.64
Total	103.10	102.86	102.98	103.04	102.93
Mg [#]	33.66	34.16	32.72	32.02	33.06
A/CNK	0.95	0.94	0.96	0.94	0.95
A/NK	1.54	1.56	1.46	1.59	1.54
K ₂ O + Na ₂ O	6.94	6.91	7.31	6.77	6.99
Na ₂ O/K ₂ O	1.58	1.58	1.69	1.39	1.60
Li	32.80	35.00	34.30	30.10	30.40
Be	2.65	2.15	2.63	2.49	2.16
Sc	9.05	8.29	8.84	7.42	7.95
V	63.80	67.60	66.20	64.60	64.50
Cr	36.40	45.80	42.80	33.70	35.40
Co	10.10	10.10	10.20	9.71	9.89
Ni	13.20	13.90	13.90	11.90	13.10
Cu	22.20	23.70	23.10	22.30	25.80
Zn	80.40	75.80	83.90	76.00	79.50
Ga	22.40	21.40	21.70	20.60	21.40
Rb	81.40	77.10	79.20	83.10	76.20
Sr	603.00	633.00	576.00	515.00	665.00
Y	7.39	7.27	7.35	6.73	7.24
Mo	1.18	1.58	1.42	0.91	1.68
Cd	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03
In	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05
Sb	0.34	0.37	0.41	0.30	0.35
Cs	7.36	7.64	7.82	9.80	6.60
Ba	700.00	673.00	697.00	622.00	700.00
La	26.50	26.30	25.00	26.00	26.30
Ce	50.20	48.90	45.80	47.70	48.90
Pr	6.17	6.13	5.89	5.91	6.05
Nd	22.90	22.70	22.10	21.90	22.40
Sm	4.18	4.10	4.06	4.01	4.16
Eu	1.11	1.12	1.03	0.99	1.16
Gd	2.73	2.42	2.49	2.31	2.12
Tb	0.42	0.35	0.45	0.40	0.44
Dy	1.49	1.51	1.67	1.58	1.49
Ho	0.26	0.30	0.26	0.36	0.31
Er	0.63	0.63	0.67	0.49	0.64

续表 2

样品号	YNW-ZK100-1-Y1-1	YNW-ZK100-1-Y1-2	YNW-ZK100-1-Y1-3	YNW-ZK100-1-Y1-4	YNW-ZK100-1-Y1-5
Tm	0.12	0.13	0.10	0.07	0.13
Yb	0.80	0.56	0.75	0.72	0.66
Lu	0.05	0.09	0.10	0.07	0.10
W	0.93	0.76	1.14	1.05	1.01
Re	<0.002	0.00	<0.002	0.00	<0.002
Tl	0.45	0.40	0.53	0.56	0.45
Pb	19.00	16.90	18.40	17.30	18.90
Bi	0.07	0.08	0.11	0.09	0.06
Th	5.73	5.51	5.50	5.45	5.55
U	1.55	1.46	1.56	1.45	1.51
Nb	10.30	9.82	10.50	9.51	9.71
Ta	0.65	0.62	0.65	0.69	0.72
Zr	122.00	98.40	115.00	92.10	101.00
Hf	4.42	3.75	3.35	2.96	3.18
Rb/Sr	0.13	0.12	0.14	0.16	0.11
Sr/Y	81.60	87.07	78.37	76.52	91.85
δEu	0.94	1.00	0.92	0.91	1.07
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	22.39	31.72	22.62	24.38	26.91
$(\text{Gd}/\text{Lu})_N$	6.53	3.20	3.07	4.29	2.72
ΣREE	117.55	115.24	110.37	112.51	114.86
ΣLREE	111.06	109.25	103.88	106.51	108.97
ΣHREE	6.49	5.99	6.49	6.00	5.89

3.1.2 微量元素

一脑丸地区花岗斑岩的稀土元素总量 (ΣREE) 为 $(110.37 \sim 117.55) \times 10^{-6}$, 稀土元素粒陨石标准化配分图中呈轻稀土元素 (LREE) 富集、重稀土元素 (HREE) 亏损的右倾型模式 (图 6a)。较高的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值 (22.39 ~

31.72) 说明轻、重稀土元素发生过强烈的分馏, 而较低的 $(\text{Gd}/\text{Lu})_N$ 比值 (5.89 ~ 6.49) 则表明重稀土元素 (HREE) 内部的分馏不显著。此外, 岩石的 Eu/Eu^* 为 0.91 ~ 1.07, 表明其 Eu 异常不明显。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中 (图 6b), 一脑丸地区花岗斑岩样品具有富集 Rb、K 等

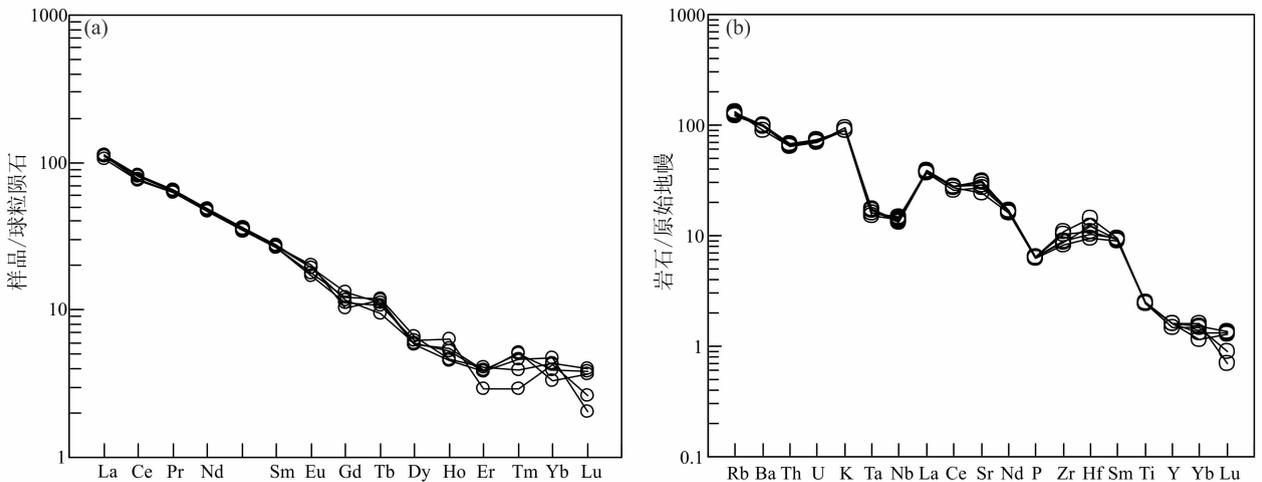


图 6 花岗斑岩稀土元素球粒陨石标准化配分图 (a) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) for granite porphyry

大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素的特征。

4 讨论

4.1 岩石成因

一脑丸地区花岗斑岩 SiO_2 含量为 63.73% ~ 64.35%, Al_2O_3 含量为 15.20% ~ 15.40%, MgO 和 $\text{Mg}^\#$ 值分别为 1.85% ~ 2.01% 和 32.02 ~ 34.16, 并且为高钾钙碱性系列岩石, 富集轻稀土元素 (LREE) 和大离子亲石元素 (Rb、K), 亏损重稀土元素 (HREE) 和高场强元素 (Nb、Ta、Ti、P), Eu 异常不明显 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.91 \sim 1.07$), 说明其起源于地壳^[24]。结合该岩石具有高 Sr ($515 \sim 665$) $\times 10^{-6}$ 和低 Y ($6.73 \sim 7.39$) $\times 10^{-6}$ 的特征, 以及 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.39 \sim 1.69$, 表明该岩石为与地壳有关的 C 型埃达克岩。在 Sr/Y - Y 图解 (图 7) 中所有点均落入埃达克岩区, 同时岩石 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值介于 0.59 ~ 0.72 之间。由此可知, 该花岗斑岩为高钾钙碱性埃达克岩。

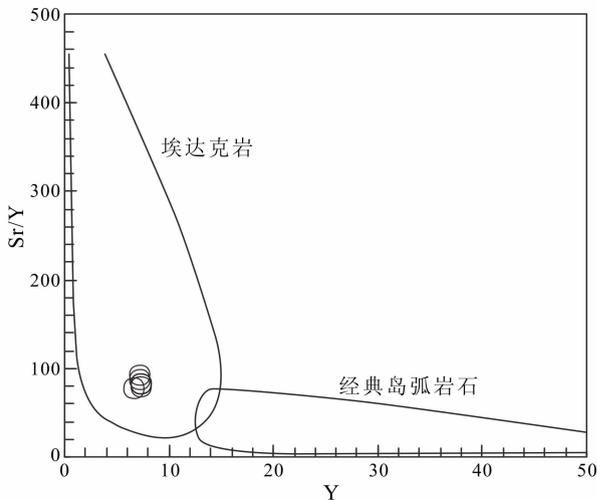


图7 一脑丸地区花岗斑岩 Sr/Y - Y 图解

Fig. 7 Sr/Y - Y diagram of granite porphyry in Yinaowan region

目前, 埃达克岩的成因主要有 5 种: ①年轻 (<25 Ma) 板块俯冲熔融^[25]; ②加厚下地壳底部的部分熔融^[26]; ③拆沉的下地壳沉入上地幔发生部分熔融^[27]; ④结晶分异作用影响^[28]; ⑤混合岩化作用影响^[29]。一脑丸地区花岗斑岩起源于下地壳, 因此可排除板块俯冲消减熔融的可能性; 其

次, 由于该花岗斑岩 $\text{Mg}^\#$ 值较低 (32.02 ~ 34.16), 且没有发现榴辉岩捕虏体^[30], 这不同于下地壳经拆沉作用沉入上地幔, 并与地幔橄榄岩发生反应产生高 Mg 岩浆^[31], 因此该花岗斑岩起源于加厚下地壳底部的部分熔融; 岩石 MREE 和 HREE 之间不是以上凹曲线模式分布 (图 6a), Eu/Eu^* 值为 0.91 ~ 1.07, 而且 $(\text{Dy}/\text{Yb})_N$ 值和 SiO_2 之间不存在明显的负相关性, 认为结晶分异过程并不是控制岩浆演化的主要途径^[32]; 在岩石中并没有发现暗色包体, 说明该岩石没有受到岩浆混合的影响^[33]。 $\text{MgO} - \text{SiO}_2$ 和 $\text{Mg}^\# - \text{SiO}_2$ 图解 (图 8) 中, 岩石样品落入增厚下地壳熔融区域, 可以判定, 一脑丸地区花岗斑岩应起源于增厚下地壳的部分熔融。

4.2 形成的构造环境

研究区处于大兴安岭地区北段, 构造-岩浆活动十分强烈, 早奥陶世 (O_1) 形成了“四隆四拗”的构造格局, 基本控制了此后各地质时期地层分布、构造活动及岩浆演化的格局^[35]。但是对于大兴安岭地区火山岩形成的构造背景, 学界一直有着不同的看法, 其一为与蒙古-鄂霍茨克洋的闭合有关^[36,37], 另一为与古太平洋板块的斜向俯冲有关^[37]。前人的研究表明, 古太平洋板块在侏罗纪 (J) 一早白垩世 (K_1) 这段时间内基本平行于东亚大陆边缘向北和北东俯冲, 直到晚白垩世才开始与东亚大陆直接俯冲^[39], 因此笔者认为一脑丸地区早白垩世的构造环境与古太平洋板块的斜向俯冲无关。而蒙古-鄂霍茨克洋于早侏罗世 (J_1) 开始自西向东呈剪刀式发生闭合, 并发生碰撞、挤压形成造山运动, 发生强烈的逆冲推覆并致使地壳加厚。在早白垩世闭合之后^[40,41], 又发生强烈的陆内伸展裂隙, 导致岩石圈减薄, 形成了一系列的裂隙盆地^[42-44]。(Y + Nb) - Rb 和 (Ta + Yb) - Rb 图 (图 9) 所示, 样品点均落于后碰撞花岗岩区域内。

一脑丸地区的花岗斑岩形成于早白垩世, 且具有埃达克岩性质, 起源于增厚下地壳的部分熔融。所以可以推断该岩石原始岩浆应形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合后、发生伸展作用之前的转换过渡时期, 即由于蒙古-鄂霍茨克洋的闭合, 发生碰撞挤压造山, 致使岩石圈下地壳加厚, 根据地壳均衡原理^[45], 下地壳下部发生部分熔融并结晶分异, 形成具有酸性性质的花岗质岩浆。

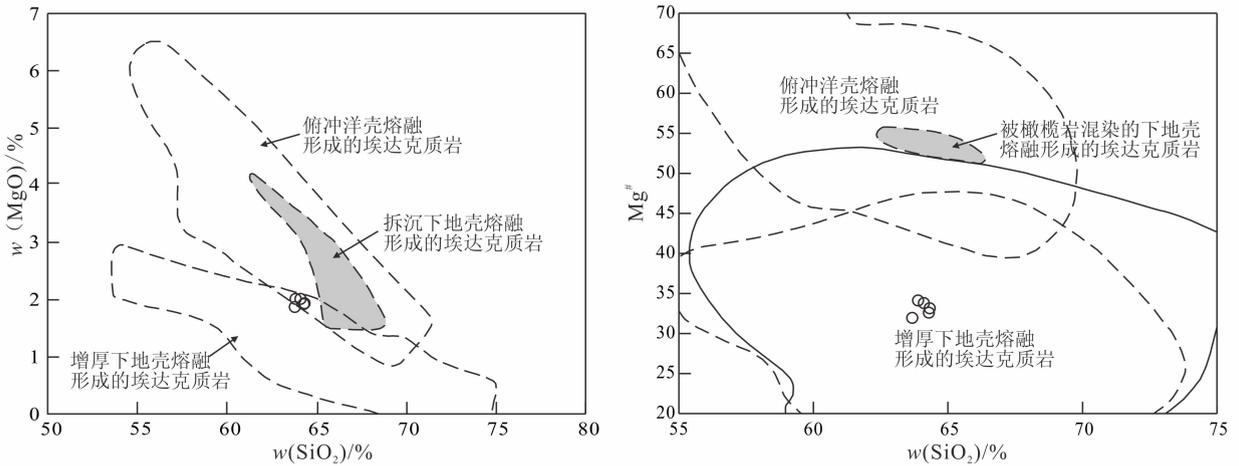


图 8 一脑丸地区花岗斑岩 MgO - SiO₂ 和 Mg[#] - SiO₂ 判别图解^[34]

Fig. 8 MgO - SiO₂ and Mg[#] - SiO₂ diagrams for granite porphyry in Yinaowan region

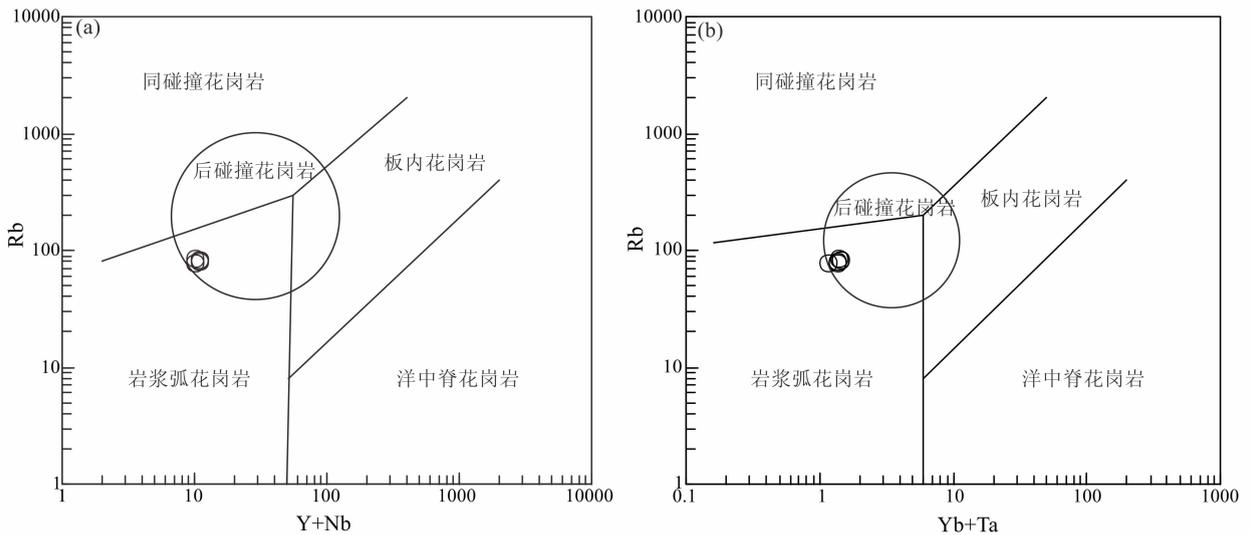


图 9 一脑丸地区花岗斑岩 (Y + Nb) - Rb 和 (Ta + Yb) - Rb 图解

Fig. 9 (Y + Nb) - Rb and (Ta + Yb) - Rb diagrams of granite porphyry in Yinaowan region

5 结论

(1) 大兴安岭北段—脑丸地区花岗斑岩锆石 U-Pb 加权平均年龄为 140.5 ± 2.4 Ma, 为早白垩世。

(2) 该花岗斑岩为高钾钙碱性、准铝质的 I 型花岗岩, 且具有埃达克岩性质, 起源于增厚下地壳的部分熔融。

(3) 该花岗岩的形成与蒙古—鄂霍茨克洋闭合后碰撞挤压造山作用有关。

参考文献:

[1] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. Nature, 1990, 347: 662-665.

[2] 王焰, 张旗, 钱青. 埃达克岩 (adakite) 的地球化学特征及其构造意义 [J]. 地质科学, 2000, 35 (2): 251-256.

WANG Yan, ZHANG Qi, QIAN Qing. Geochemical characteristics and tectonic significance of Adakite [J].

- Scientia Geologica Sinica, 2000, 35 (2): 251-256.
- [3] 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义 [J]. 岩石学报, 2001, 17 (2): 236-244.
ZHANG Qi, WANG Yan, QIAN Qing, et al. Characteristics and tectonic-metallogenic significance of Yanshanian adakite in eastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17 (2): 236-244.
- [4] 张旗, 钱青, 王二七, 等. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示 [J]. 地质科学, 2001, 36 (2): 248-255.
ZHANG Qi, QIAN Qing, WANG Er-qi, et al. Implications of adakite, plateau of eastern China in the-middle Late Yanshanian [J]. Scientia Geologica Sinica, 2001, 36 (2): 248-255.
- [5] 董申保, 田伟. 埃达克岩的原义、特征与成因 [J]. 地学前缘, 2004, 11 (4): 585-594.
DONG Shen-bao, TIAN Wei. The original meaning, characteristics, origin of adakite [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11 (4): 585-594.
- [6] 赵振华, 王强, 熊小林, 等. 新疆北部的两类埃达克岩 [J]. 岩石学报, 2006, 22 (5): 1249-1265.
ZHAO Zhen-hua, WANG Qiang, XIONG Xiao-lin, et al. Two kinds of adakitite rocks in northern Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22 (5): 1249-1265.
- [7] Ahmadian J, Sarjoughian F, Lentz D, et al. Eocene K-rich adakitite rocks in the central Iran: implications for evaluating its Cu-Au-Mo metallogenic potential [J]. Ore Geology Reviews, 2016, 72: 323-342.
- [8] Kay R W. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific ocean crust [J]. Journal of Volcanology & Geothermal Research, 1978, 4 (1/2): 117-132.
- [9] Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemitic-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons [J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95 (13): 21503-21521.
- [10] 张旗, 王焰, 刘伟, 等. 埃达克岩的特征及其意义 [J]. 地质通报, 2002, 21 (7): 431-435.
ZHANG Qi, WANG Yan, LIU Wei, et al. The characteristics and significance of adakite [J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21 (7): 431-435.
- [11] 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): 217-240.
SHE Hong-quan, LI Jin-wen, XIANG An-ping, et al. Protolith zircon U-Pb dating and middle-north of Great Xing'an Range and its relationship with regional tectonic evolution [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28 (2): 217-240.
- [12] 林强, 葛文春, 孙德有, 等. 中国东北地区中生代火山岩的大地构造意义 [J]. 地质科学, 1998, 33 (2): 129-139.
LIN Qiang, GE Wen-chun, SUN De-you, et al. Geotectonic significance of Mesozoic volcanic rocks in Northeast China [J]. Scientia Geologica Sinica, 1998, 33 (2): 129-139.
- [13] 孟凡超, 刘嘉麒, 崔岩, 等. 中国东北地区中生代构造体制的转变: 来自火山岩时空分布与岩石组合的制约 [J]. 岩石学报, 2014, 30 (12): 3569-3586.
MENG Fan-chao, LIU Jia-qi, CUI Yan, et al. Transition of Mesozoic tectonic system in Northeast China: constraints derived from spatio-temporal distribution and rock assemblages [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30 (12): 3569-3586.
- [14] Zorin Y A. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia [J]. Tectonophysics, 1999, 306 (1): 33-56.
- [15] 李锦轶, 莫申国, 和政军, 等. 大兴安岭北段地壳左行走滑运动的年代及其对中国东北及邻区中生代以来地壳构造演化重建的制约 [J]. 地学前缘, 2004, 11 (3): 157-168.
LI Jin-yi, MO Shen-guo, HE Zheng-jun, et al. The age of left-lateral strike-slips movement of northern Great Xing'an Range and its constraints on the crustal tectonic evolution and reconstruction since Mesozoic in northeastern China [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11 (3): 157-168.
- [16] 许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约 [J]. 岩石学报, 2013, 29 (2): 339-353.
XU Wen-liang, WANG Feng, PEI Fu-ping, et al. Mesozoic tectonic regimes and regional metallogenic settings in Northeast of China: constraints from temporal and spatial variation of Mesozoic volcanic assemblages [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29 (2): 339-353.
- [17] Ludwig K R. User's manual for isoplot 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4: 1-70.
- [18] Belousova E, Griffin W L, O'reilly S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of

- source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143 (5): 602-622.
- [19] 李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述 [J]. *地质调查与研究*, 2009, 32 (3): 161-174.
LI Chang-min. Conclusions of genetic mineralogy of zircons and zircon micro dating [J]. *Geological Survey and Research*, 2009, 32 (3): 161-174.
- [20] Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Early Mesozoic southward subduction history of the Mongol-Okhotsk oceanic plate; evidence from geochronology and geochemistry of Early Mesozoic intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China [J]. *Gondwana Research*, 2016, 31: 218-240.
- [21] Li L, Sun F, Li B, et al. Early Mesozoic southward subduction of the eastern Mongol-Okhotsk Oceanic Plate; evidence from zircon U - Pb - Hf isotopes and whole-rock geochemistry of Triassic granitic rocks in the Mohe area, NE China [J]. *Resource Geology*, 2016, 66 (4): 386-403.
- [22] Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types [J]. *Pacific Geology*, 1974, 8: 173-174.
- [23] 马鸿文. 花岗岩成因类型的判别分析 [J]. *岩石学报*, 1992, 8 (4): 341-350.
MA Hong-wen. Discriminant analysis of genetic types of granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1992, 8 (4): 341-350.
- [24] 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 (3): 392-402.
- [25] 张旗, 许继峰, 王焰, 等. 埃达克岩的多样性 [J]. *地质通报*, 2004, 23 (9): 959-965.
ZHANG Qi, XU Ji-feng, WANG Yan, et al. The diversity of adakite [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23 (9): 959-965.
- [26] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. *Nature*, 1993, 362 (6416): 144-146.
- [27] Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton [J]. *Nature*, 2004, 432 (7019): 892-897.
- [28] Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. Adakites without slab melting; high pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2006, 243 (3/4): 581-593.
- [29] Guo F, Nakamura E, Fan W, et al. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing; Yanji area, NE China [J]. *Journal of Petrology*, 2007, 48 (4): 661-692.
- [30] 高山, 金振民, 金淑燕, 等. 大别超高压榴辉岩高温高压下地震波速和密度的初步实验研究: 对造山带地壳深部组成和莫霍面性质的启示 [J]. *科学通报*, 1997, 42 (8): 862-866.
GAO Shan, JIN Zhen-min, JIN Shu-yan, et al. Preliminary experimental study on seismic wave velocity and density of high temperature and high pressure of eclogites in Dabie-implications on deep crustal composition of orogenic belts and property of Moho surface [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42 (8): 862-866.
- [31] Kay R W, Kay S M. Delamination and delamination magmatism [J]. *Tectonophysics*, 1993 (219): 177-189.
- [32] 刘金龙, 孙丰月, 李良, 等. 青海阿尼玛卿蛇绿混杂岩带西段哥日卓托杂岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素 [J]. *地球科学*, 2015, 40 (6): 965-981.
LIU Jin-long, SUN Feng-yue, LI Liang, et al. Geochronology, geochemistry and Hf isotope of Gerizhuotuo complex rocks of Animaqing ophiolitic mixite belts in Qinghai [J]. *Earth Science*, 2015, 40 (6): 965-981.
- [33] 杨绍, 吕宏伟, 屈小相, 等. 西昆仑早中志留世埃达克岩的发现及地质意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2016, 35 (4): 563-578.
YANG Shao, LYU Hong-wei, QU Xiao-xiang, et al. Discovery and geological significance of Early Silurian adakite in West Kunlun [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2016, 35 (4): 563-578.
- [34] 王强, 赵振华, 许继峰, 等. 天山北部石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 岛弧玄武质岩: 对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义 [J]. *岩石学报*, 2006, 22 (1): 11-30.
WANG Qiang, ZHAO Zhen-hua, XU Ji-feng, et al. Carboniferous adakite-high Mg andesite-Nb enriched island arc basaltic rocks in north of Tianshan; Phanerozoic crustal growth of orogenic belt in the central Asian and gold copper metallogenic significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22 (1): 11-30.
- [35] 姚志强. 黑龙江省多宝山及其邻区寻找大型斑岩铜矿的研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1995: 4-14.
YAO Zhi-qiang. Study on finding large porphyry copper deposits in Duobaoshan and its adjacent areas in Heilongjiang Province [M]. Beijing: Geological Publishing

- House, 1995: 4-14.
- [36] Fan W M, Guo F, Wang Y J, et al. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China [J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 2003, 121 (1): 115-135.
- [37] 苟军, 孙德有, 赵忠华, 等. 满洲里南部白音高老组流纹岩锆石 U-Pb 定年及岩石成因 [J]. *岩石学报*, 2010, 26 (1): 333-344.
- GOU Jun, SUN De-you, ZHAO Zhong-hua, et al. Zircon U-Pb dating and petrogenesis of rhyolite in Baiyingaolao Formation, southern Manzhouli [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26 (1): 333-344.
- [38] 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.
- [39] Maruyama S, Send T. Orogeny and relative plate motions: example of the Japanese Islands [J]. *Tectonophysics*, 1986, 127 (3): 305-329.
- [40] 莫申国, 韩美莲, 李锦轶. 蒙古-鄂霍茨克造山带的组成及造山过程 [J]. *山东科技大学学报 (自然科学版)*, 2005, 24 (3): 50-52.
- MO Shen-guo, HAN Mei-lian, LI Jin-yi. Constitution and orogenic process of the Mongolia-Okhotsk orogenic belt [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2005, 24 (3): 50-52.
- [41] 黄始琪, 董树文, 张福勤, 等. 蒙古-鄂霍茨克构造带中段构造变形及动力学特征 [J]. *地球学报*, 2014, 35 (4): 415-424.
- HUANG Shi-qi, DONG Shu-wen, ZHANG Fu-qin, et al. Middle tectonic deformation and dynamic characteristics of the Mongolia Okhotsk tectonic belt [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35 (4): 415-424.
- [42] 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.
- GE Wen-chun, LI Xian-hua, LIN Qiang, et al. Geochemical characteristics and significance of Early Cretaceous alkaline rhyolite in Hulun Lake [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2001, 36 (2): 176-183.
- [43] 张岳桥, 赵越, 董树文, 等. 中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化阶段 [J]. *地学前缘*, 2004, 11 (3): 123-133.
- ZHANG Yue-qiao, ZHAO Yue, DONG Shu-wen, et al. Tectonic evolution stages of rift basins of Early Cretaceous in eastern China and adjacent areas [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11 (3): 123-133.
- [44] 万天丰. 中国大地构造学纲要 [M]. 北京: 地质出版社, 2004: 135-162.
- WAN Tian-feng. The outline of Chinese geotectonics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 135-162.
- [45] 杨学祥. 地壳均衡与水平运动 [J]. *世界地质*, 1988, 7 (1): 47-52.
- YANG Xue-xiang. Crustal equilibrium and horizontal movement [J]. *Global Geology*, 1988, 7 (1): 47-52.