

doi: 10.12029/gc20170210

李研, 王建, 韩志滨, 侯晓光, 王石岩. 2017. 大兴安岭北段八大关地区早侏罗世流纹岩锆石 U-Pb 定年与岩石成因[J]. 中国地质, 44(2): 346-357.

Li Yan, Wang Jian, Han Zhibin, Hou Xiaoguang, Wang Shiyan. 2017. Zircon U-Pb dating and petrogenesis of the Early Jurassic rhyolite in Badaguan area, northern Da Hinggan Mountains[J]. Geology in China, 44(2): 346-357(in Chinese with English abstract).

大兴安岭北段八大关地区早侏罗世流纹岩锆石 U-Pb 定年与岩石成因

李研^{1,2} 王建¹ 韩志滨² 侯晓光² 王石岩²

(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: 大兴安岭北段八大关地区首次发现早侏罗世火山岩, 该类岩石主要由流纹岩组成, 含少量英安岩和流纹质凝灰岩, LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年结果显示其形成于 185~190 Ma, 岩石地球化学研究表明, 流纹岩具有高硅富碱, 贫镁钙和高 FeO^T/MgO 比值的特征, 属于高钾钙碱性系列; 稀土总量不高($\Sigma\text{REE}=103.80\times 10^{-6}\sim 194.31\times 10^{-6}$), 轻重稀土分馏较明显($(\text{La}/\text{Yb})_n=7.12\sim 10.22$), 中等负 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.34\sim 0.74$), 微量元素以富集 Rb、Ba、Th、U、K 和 LREE, 强烈亏损 Sr、P、Ti, 相对亏损 Nb、Ta 为特征, 显示地壳来源, 结合较低的 Ga/Al 比值, 该区流纹岩具有 I 型花岗岩特点, 在 (Y+Nb)-Rb 和 (Yb+Ta)-Rb 判别图解上显示其形成于活动大陆边缘环境。综合研究表明, 八大关地区早侏罗世之前为活动陆缘环境, 蒙古-鄂霍茨克大洋板块向额尔古纳地块之下俯冲。

关键词: 早侏罗世; 流纹岩; 锆石 U-Pb 定年; 岩石成因; 八大关

中图分类号: P588.14¹ 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2017)02-0346-12

Zircon U-Pb dating and petrogenesis of the Early Jurassic rhyolite in Badaguan area, northern Da Hinggan Mountains

LI Yan^{1,2}, WANG Jian¹, HAN Zhibin², HOU Xiaoguang², WANG Shiyan²

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China; 2. No. 240 Institute of Nuclear Industry, Shengyang 110032, Liaoning, China)

Abstract: The newly-discovered Early Jurassic rhyolite in Badaguan area of Da Hinggan Mountains is of great significance in investigating the tectonic evolution history of Northeast China. The rocks are mainly composed of rhyolites, with a small amount of dacitic and rhyolitic tuffs. LA-ICPMS shows the rhyolites were formed in Early Jurassic, and their formation ages range from 185 Ma to 190 Ma. Geochemical studies show that the rhyolites are characterized by rich silicon and alkalis, poor calcium and magnesium and high FeO^T/MgO ratios. Hence the rhyolites belong to high-potassium calc-alkaline rocks. All samples have the

收稿日期: 2016-06-22; 改回日期: 2017-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(41472051)和中国地质调查局地质调查项目(12120113053700)资助。

作者简介: 李研, 男, 1990年生, 硕士生, 主要从事岩石地球化学方面研究; E-mail: 1483792423@qq.com。

通讯作者: 王建, 男, 1964年生, 博士生导师, 教授, 主要从事地球化学; E-mail: wangjian304@jlu.edu.cn。

similar characteristics of REE patterns, which are characterized by relatively poor total REE content ($\sum \text{REE}=103.80 \times 10^{-6} - 194.31 \times 10^{-6}$), significant fractionation of HREE and REE $[(\text{La}/\text{Yb})]_{\text{N}} = 7.12 - 10.22$ and moderate Eu negative anomalies ($\delta\text{Eu}=0.34 - 0.74$). The rhyolites are characterized by enrichment of Rb, Th, U, K and LREE, strong depletion of Ba, Sr and HFSE (e.g., Nb, Ta, P and Ti), and relative loss of Nb, Ta. The relatively low Ga/Al ratios indicate that the rhyolites are I-type granites of high differentiation. The discrimination diagrams of (Y+Nb)-Rb and (Yb+Ta)-Rb show that the rhyolites were formed on the active continental margin. The comprehensive studies show that the Badaguan area was located on an active continental margin before Early Jurassic, which was affected by the subduction of Mongol-Okhotsk plate towards metamorphic rocks in the Erguna Block.

Key words: Early Jurassic; rhyolite; zircon U-Pb dating; petrogenesis; tectonic setting; Badaguan area

About the first author: LI Yan, male, born in 1990, master, majors in geochemistry; E-mail: 1483792423@qq.com.

About the corresponding author: WANG Jian, male, born in 1964, professor, supervisor of doctor candidates, majors in geochemistry; E-mail: wangjian304@jlu.edu.cn.

Fund support: Supported by the National Natural Science Fund (No.41472051) and China Geological Survey Program (No. 12120113053700).

1 引言

位于兴蒙造山带东段的大兴安岭巨型火山岩带以中生代火山岩面积宏大、岩石种类繁多、地球化学特征及形成构造背景复杂,一直是众多国内外学者关注研究的热点,近年来,随着大兴安岭中生代火山岩研究程度的不断提高,积累了一大批高精度锆石U-Pb和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄与地球化学资料,并且主要得出以下观点。(1)Zhang et al.(2008)认为大兴安岭中生代火山岩主要形成于早白垩世。(2)大兴安岭南段火山岩主要为钙碱性系列岩石为主,北部以碱性系列为主,钙碱性系列玄武岩岩浆均起源于富集型地幔。各组酸性火山岩可划分为高Sr流纹岩类和低Sr流纹岩两类,其中高Sr流纹岩由钙碱性玄武岩浆分异形成,低Sr流纹岩由下地壳基性岩石部分熔融产生的(葛文春等,1997;林强等,2003)。(3)中生代火山岩构造背景主要有地幔柱成因(葛文春等,2000b;林强等,2003)、与古太平洋板块俯冲有关(Wang et al., 2006; Zhang et al., 2006, 2010; 陈丽丽等, 2015)、与蒙古-鄂霍茨克洋演化有关(陈志广等, 2006; Meng, 2006; Wang et al., 2006; 张连昌等, 2007)3种观点。

虽然前人通过年代学、岩石地球化学等方法对大兴安岭北段地区中生代火山岩已经进行了大量研究,但是近年来研究成果却显示该区火山岩主要形成时代为中生代晚期,即晚侏罗至早白垩世,早侏罗世火山岩却鲜有报道,况且在早期的研究过程中,人们对于火山岩形成时代的确定主要依据岩石

之间接触关系、区域地层对比、岩石组合、生物地层学、和K-Ar、Rb-Sr测年数据,但是由于八大关地区构造形迹极其复杂,火山岩大部分都经过后期改造,破坏了样品中原有的同位素体系,因此这些火山岩年龄不能代表八大关地区火山岩的实际形成时代(蒋国源等,1988;葛文春等,2001)。鉴于此,笔者对大兴安岭北段八大关地区新发现的早侏罗世流纹岩进行详细的岩相学、年代学、地球化学研究,以期阐明成因及构造环境,通过构造环境来揭示八大关地区早侏罗世时期的构造属性,为进一步深刻理解大兴安岭巨型火山岩带成因提供科学依据。

2 地质背景与岩石学特征

大兴安岭北段八大关地区地处中俄边界(图1),位于著名的得尔布干构造带上(侯召硕等,2013),是古生代古亚洲构造域、中-新生代环太平洋构造域、与蒙古鄂霍茨克构造域强烈叠加、复合、转换部位,构造形迹极其复杂,中生代火山岩浆作用和花岗岩浆侵入作用强烈,断裂构造发育,以NW向和NE向断裂为主,其次是SN向断裂。研究区前中生代地层零星分布,仅由中元古代佳疙瘩群变质岩系组成,晚中生代火山作用强烈,分布面积较广,依据李文国等地层清理意见,该区中生代火山岩地层自下而上依次为中侏罗世塔木兰沟组(J_2t),晚侏罗世满克头鄂博组(J_3mk) (相当于吉祥峰组、木瑞组和上库力组一段)、玛尼吐组(J_3mn) (相当于上库力组二段),其中塔木兰沟组为一套陆相中性、中基性火山岩,满克头鄂博组主要为酸性火山岩夹火山沉积岩、玛

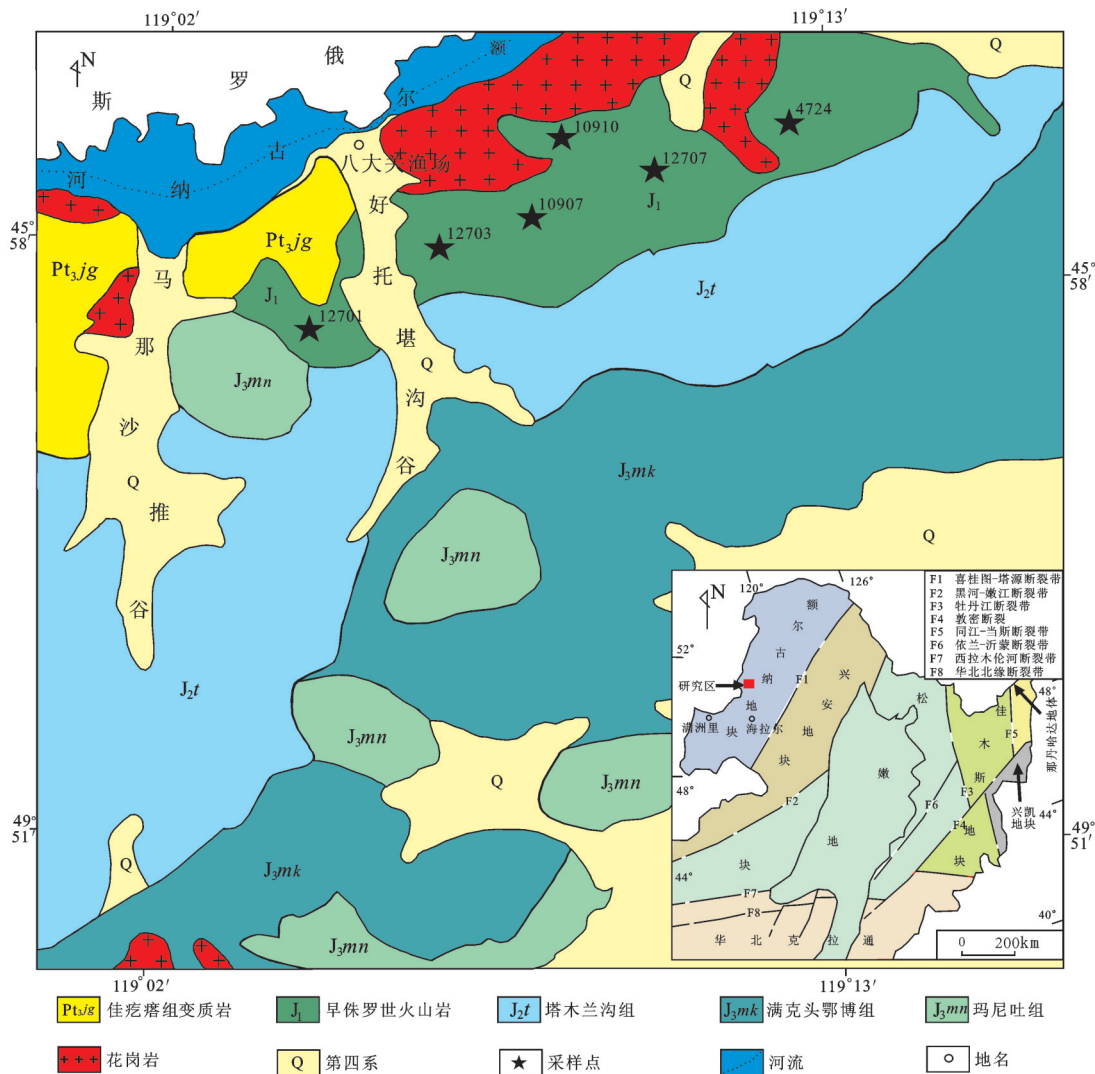


图1 八大关地区早侏罗世流纹岩地质简图^①

Fig.1 Sketch geological map of Early Jurassic rhyolite in Badaguan^①

尼吐组为中性火山熔岩-中酸性火山碎屑岩夹沉积岩, 侵入岩主要为正长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、花岗斑岩为主, 其中大部分花岗岩被划归到燕山期, 但最近研究结果显示, 这部分花岗岩应该划归到印支期(笔者未发表资料), 本区所研究的早侏罗世流纹岩原被划归到满克头鄂博组。流纹岩呈灰色、灰白色、灰红色, 斑状结构, 球粒状构造、块状构造、弱流纹构造, 岩石轻微硅化, 斑晶矿物为斜长石(<3%)+碱性长石(3%~5%), 斜长石斑晶呈板柱状、聚片双晶发育, 较弱绢云母化, 粒径为1~3 mm; 碱性长石呈板状, 负低突起, 具卡式双晶, 较弱高岭土化, 粒径为1.5~3 mm。基质为大量隐晶-霏细状长英质集合

体沿流纹方向密集分布(图2)。

3 分析测试方法

锆石分选工作由河北省廊坊区域地质调查研究院负责, 锆石制靶、显微图像采集、在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, 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 mm, 激光能量密度 10 J/cm², 剥蚀频率 8 Hz。剥蚀样品前首先采集 30 s 的空白,

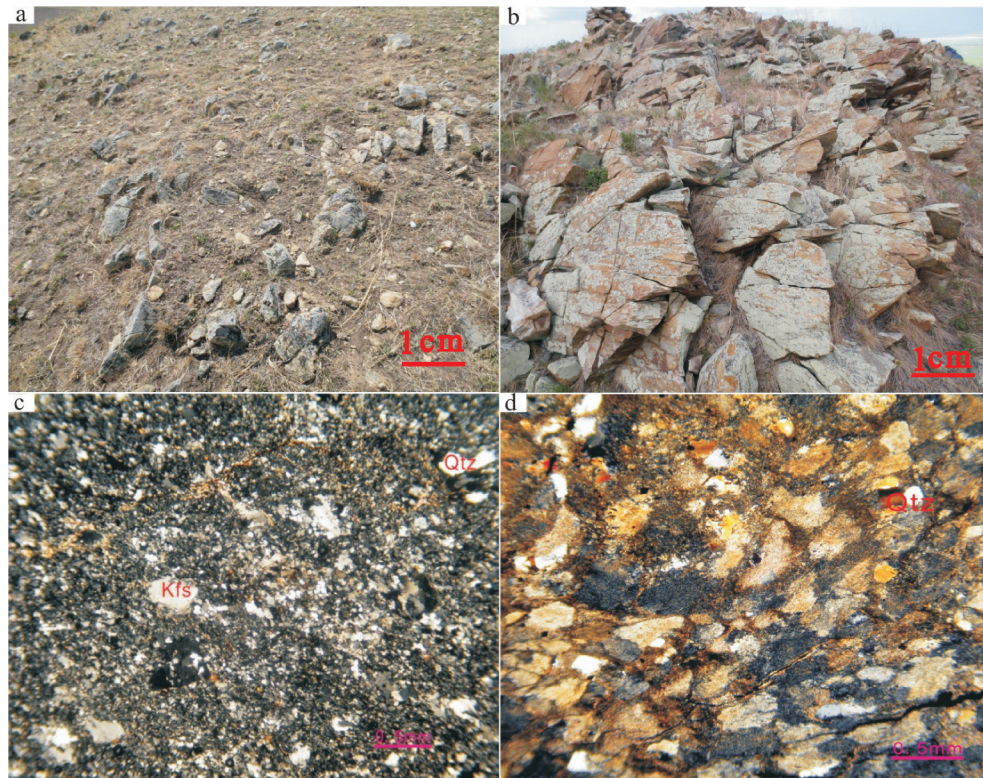


图2 八大关地区流纹岩野外和显微照片

a, b—流纹岩野外露头; c—硅化流纹岩; d—球粒流纹岩
Kfs—钾长石; Qtz—石英

Fig.2 Field and microstructure photographs of the rhyolite in Badagua
a, b—Rhyolite outcrop; c—Silicified rhyolite; d—Pyromeride
Kfs—Orthoclase; Qtz—Quartz

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 mL/min;辅助气为Ar气,气流量为1.15 L/min。对于不用同位素的采集时间, ^{204}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb 为20 ms, ^{232}Th 、 ^{238}U 为15 ms, ^{49}Ti 为20 ms,其余元素为6 ms。使用标准锆石91500(1062 Ma)作为外标进行同位素比值校正,标准锆石GJ-1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,年龄及谐和图使用Isoplot/Ex(3.0)给出普通铅校正使用给出的程序计算。分析数据及锆石U-Pb谐和图给出误差为 1σ 。元素地球化学数据在核工业二四〇研究所东北分析测试中心完成,主量元素采用XRF玻璃熔片法分析,分析精度和准确度优于5%,稀土和微量元素采用ICP-MS分析方法,分析精度和准确度一般优于10%。

4 分析测试结果

4.1 锆石U-Pb年代学

所测2件流纹岩样品(样号:10907、10910)的锆石晶形较好,均呈长柱状或短柱状,发育明显岩浆成因的振荡生长环带结构(图3)。锆石的Th/U比值均大于0.1,分别为0.25~1.01、0.26~1.24,也表明为岩浆成因的锆石。测试分析结果如表1和图4所示。

10907样品(流纹岩,采样位置坐标:49°58'01" N, 119°07'03"E):锆石中20个分析点全部位于U-Pb谐和线上或其附近,20个检测数据的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄保持在182~198 Ma范围之内,加权平均年龄值是(185±2) Ma,MSWD=6。

10910样品(流纹岩,采样位置坐标:49°58'54" N, 119°07'25"E):锆石中20个分析点中有10个位于U-Pb谐和线上或其附近,10个检测数据的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄保持在188~197 Ma,加权平均年龄值是

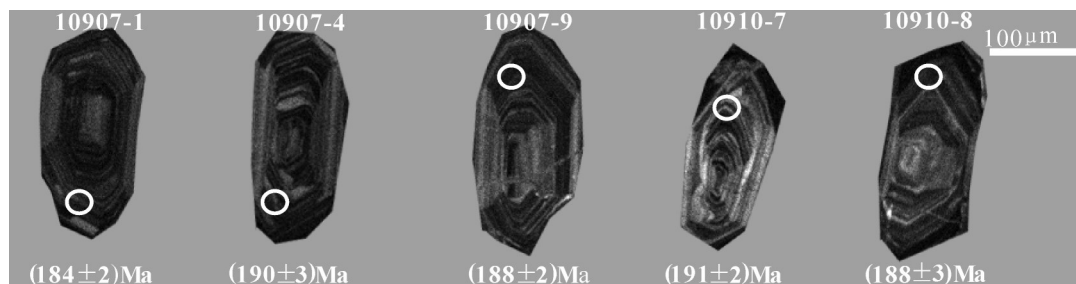


图3 八大关地区流纹岩中部分锆石CL图像和年龄值

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

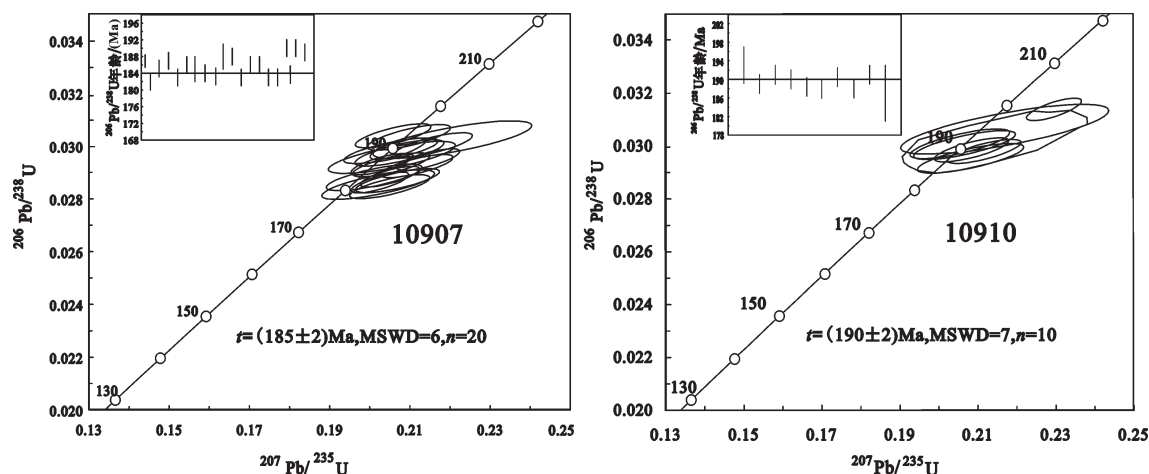


图4 八大关地区流纹岩石锆石U-Pb年龄谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams for the rhyolite in Badaguan

(190±2) Ma, MSWD=7。这一年龄可以代表岩石形成的时代。另有几个锆石给出了不同的年龄, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 221~421 Ma, 明显大于多数分析点的结果, 为岩浆上升时所捕获地壳岩石的年龄锆石。

4.2 岩石地球化学特征

选取 6 件流纹岩样品进行了主量、微量元素分析(表 2)。

4.2.1 主量元素

由表 2 可知, 八大关地区早侏罗世流纹岩 SiO_2 含量较高, $\text{SiO}_2=72.17\% \sim 74.26\%$, 铝弱过饱和, $\text{Al}_2\text{O}_3=10.11\% \sim 15.80\%$, 铝饱和指数 A/CNK 在 0.76~1.17(图 5), 为弱准铝质到弱过铝质岩石, 全碱含量较高, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=6.99\% \sim 8.41\%$, 除 10910 点外, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$, 为钾质, 过碱指数 $\text{AKI}=0.64 \sim 0.89$, 镁钙含量较低, $\text{MgO}=0.26\% \sim 0.52\%$, $\text{CaO}=0.34\% \sim 2.32\%$, 高 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 比值(2.84~3.84), 在 TAS 火山岩分类命

名图解中, 所有样品落入流纹岩范围内(图 6)。

4.2.2 稀土、微量元素

稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 7)显示, 所有流纹岩样品具有相同的变化趋势, 即轻稀土富集的右倾特征, 指示其为壳源型, 稀土总量不高, $\Sigma \text{REE}=103.80 \times 10^{-6} \sim 194.31 \times 10^{-6}$, 轻重稀土元素比值较高, $\text{LREE}/\text{HREE}=8.41 \sim 11.21$, 轻稀土元素的分馏系数 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=7.12 \sim 10.22$, 重稀土元素的分馏系数 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.22 \sim 1.62$, LREE 分馏程度高于 HREE, Eu 多为中等负异常型, $\delta\text{Eu}=0.34 \sim 0.74$, 暗示岩浆源区有斜长石残留或岩浆演化过程中经历了斜长石的分离结晶作用。

微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 7)显示, 本区流纹岩富集大离子亲石元素(LILE) Rb、Th、U、K 等, Ba 相对于 Rb、Th 富集较弱, 强烈亏损高场强元素(HFSE), Sr、P、Ti、Nb、Ta 相对亏损, 与东北地区 I

表1 八大关地区流纹岩锆石U-Pb同位素分析结果

Table 1 Zircon U-Pb dating results for the rhyolite in Badaguan

样品 测点	²⁰⁶ Pb /10 ⁻⁶	Th /10 ⁻⁶	U /10 ⁻⁶	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
					比值	误差/1 δ	比值	误差/1 δ	比值	误差/1 δ	年龄/Ma	误差/1 δ	年龄/Ma	误差/1 δ
10907-1	30	10	37	0.27	0.2019	0.0015	0.0275	0.0005	0.0277	0.0003	183	5	184	2
10907-2	30	10	37	0.27	0.2069	0.0069	0.0287	0.0003	0.0275	0.0005	187	12	186	3
10907-3	77	426	718	0.59	0.0523	0.0018	0.2069	0.0069	0.0287	0.0003	182	2	186	3
10907-4	47	318	355	0.90	0.0521	0.0016	0.2159	0.0064	0.0301	0.0003	191	2	190	3
10907-5	40	311	327	0.95	0.0528	0.0014	0.2146	0.0052	0.0295	0.0003	187	2	189	2
10907-6	45	220	249	0.88	0.0506	0.0021	0.2011	0.0079	0.0288	0.0003	183	2	194	3
10907-7	37	275	316	0.87	0.0502	0.0013	0.2031	0.0051	0.0293	0.0003	186	2	191	2
10907-8	45	10	38	0.27	0.0529	0.0032	0.2206	0.0131	0.0302	0.0005	192	3	198	6
10907-9	32	228	249	0.92	0.0513	0.0013	0.2025	0.0047	0.0286	0.0003	182	2	188	2
10907-10	41	239	299	0.80	0.0541	0.0022	0.2026	0.0078	0.0271	0.0003	173	2	187	3
10907-11	42	199	279	0.71	0.0504	0.0027	0.2055	0.0105	0.0296	0.0004	188	3	190	6
10907-12	37	354	393	0.90	0.0502	0.0012	0.2070	0.0046	0.0299	0.0003	190	2	189	2
10907-13	52	239	290	0.82	0.0516	0.0013	0.2050	0.0049	0.0288	0.0003	183	2	182	2
10907-14	40	9	36	0.25	0.0525	0.0016	0.21163	0.0060	0.0292	0.0003	186	2	191	2
10907-15	30	67	148	0.45	0.0508	0.0016	0.2054	0.0064	0.0293	0.0003	186	2	190	3
10907-16	21	305	326	0.94	0.0514	0.0024	0.2021	0.0093	0.0285	0.0003	181	2	182	4
10907-17	47	432	428	1.01	0.0522	0.0018	0.2050	0.0066	0.0285	0.0003	181	2	182	3
10907-18	61	250	304	0.82	0.0502	0.0017	0.2097	0.0069	0.0303	0.0003	193	2	194	3
10907-19	43	257	315	0.82	0.0491	0.0016	0.2058	0.0062	0.0304	0.0003	193	2	188	3
10907-20	45	9	36	0.25	0.0506	0.0019	0.2074	0.0073	0.0297	0.0003	189	2	193	3
10910-1	117	621	736	0.84	0.0583	0.0016	0.2939	0.0075	0.0366	0.0004	233	8	230	2
10910-2	105	348	642	0.54	0.0530	0.0022	0.2552	0.0104	0.0349	0.0004	231	8	221	3
10910-3	23	190	165	1.15	0.0513	0.0043	0.2169	0.0176	0.0306	0.0006	195	4	193	6
10910-4	37	395	268	1.48	0.0515	0.0016	0.2116	0.0062	0.0298	0.0003	189	2	194	2
10910-5	26	224	171	1.31	0.0499	0.0022	0.2065	0.0086	0.0300	0.0004	191	2	197	3
10910-6	11	56	68	0.82	0.0604	0.0086	0.2781	0.0386	0.0334	0.0012	212	7	248	15
10910-7	25	220	178	1.24	0.0506	0.0016	0.2084	0.0063	0.0299	0.0003	190	2	191	2
10910-8	76	232	452	0.51	0.0511	0.0014	0.2553	0.0064	0.0362	0.0003	229	2	243	4
10910-9	86	262	291	0.90	0.0555	0.0021	0.4896	0.0176	0.0640	0.0008	400	5	421	7
10910-10	32	292	233	1.25	0.0511	0.0023	0.2081	0.0090	0.0295	0.0004	188	2	188	3
10910-11	36	11	44	0.26	0.0566	0.0021	0.2271	0.0082	0.0291	0.0003	185	2	196	3
10910-12	30	234	206	1.13	0.0530	0.0012	0.2295	0.0047	0.0314	0.0003	193	2	195	2
10910-13	73	249	459	0.54	0.1299	0.0018	0.4784	0.0058	0.0267	0.0002	259	2	230	1
10910-14	308	4776	1717	2.78	0.0554	0.0044	0.4437	0.0344	0.0581	0.0012	364	7	407	15
10910-15	24	61	96	0.64	0.0512	0.0021	0.2562	0.0103	0.0363	0.0004	230	3	271	5
10910-16	41	147	248	0.59	0.0650	0.0039	0.2500	0.0144	0.0279	0.0005	173	3	189	4
10910-17	35	11	43	0.26	0.0502	0.0012	0.2521	0.0058	0.0364	0.0003	259	2	250	1
10910-18	25	193	167	1.15	0.1059	0.0020	0.4576	0.0078	0.0314	0.0003	188	2	183	2
10910-19	76	231	458	0.50	0.0495	0.0021	0.2053	0.0084	0.0301	0.0004	191	2	191	4
10910-20	91	319	533	0.60	0.0600	0.0078	0.2439	0.0310	0.0295	0.0010	187	6	193	10

型花岗岩特点相类似, Sr的亏损可能与源区残留斜长石有关, P、Ti的强烈亏损可能与钛铁矿、金红石及磷灰石等副矿物分离结晶有关, Nb、Ta相对亏损反映了岩浆来源于地壳或是受到了地壳物质的强烈混染, 又或者与源区有流体的交代作用有关(武鹏飞等, 2013; 孙崇波等, 2016)。

5 讨论

5.1 锆石U-Pb年龄

本文高精度锆石U-Pb定年结果显示, 与八大关地区原所标定的满克头鄂博组流纹岩形成时代不一致, 其形成时代分别是(185±3) Ma和(190±3) Ma, 均为早侏罗世, 早于先前人们所认为的晚侏罗世, 因此该期火山事件并不能划分为满克头鄂博

组, 且在区域上与满洲里—额尔古纳地区新发现的一套粗玄岩、玄武岩、玄武粗安岩到安山岩组合的火山岩(王伟等, 2014), 吉林西北部发现的早侏罗世红旗组岩石和内蒙古扎兰屯地区的查伊河组有相关性, 应属于同期火山事件。同时, 近年来该区域也发现存在早侏罗世花岗岩质岩石(陈志广等, 2010; Wu et al., 2011; 余宏全等, 2012; Sun et al., 2013), 进一步证实了包括八大关在内的整个大兴安岭地区存在早侏罗世岩浆事件。

5.2 岩石成因类型及源区特征

本文所研究的早侏罗世酸性流纹岩样品A/CNK=0.76~1.17, 为准铝质到弱过铝质, 岩石具有高硅, 富碱, 贫镁钙, 富集大离子亲石元素(LILE) Rb、Th、U、K, 亏损高场强元素(HFSE) Sr、P、Ti。实验研

表2 八大关地区流纹岩主量、微量元素分析结果(主量元素%; 微量元素 10^{-6})Table 2 Abundances of major and trace elements for the granites in Badaguan area (major elements: %; trace elements: 10^{-6})

样品号	10907	10910	12701	12703	12707	4724
SiO ₂	72.17	74.26	72.89	72.95	72.9	75.78
TiO ₂	0.33	0.26	0.29	0.29	0.28	0.23
Al ₂ O ₃	15.80	14.20	14.12	13.80	14.12	10.10
Fe ₂ O ₃	1.06	0.75	1.10	1.37	0.96	1.08
FeO	0.46	0.55	0.43	0.32	0.47	0.13
MnO	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.07
MgO	0.52	0.34	0.46	0.47	0.49	0.26
CaO	0.34	0.58	1.01	1.2	1.07	2.35
Na ₂ O	3.43	4.47	2.96	3.15	3.06	2.53
K ₂ O	4.16	3.41	5.13	5.02	5.35	4.46
P ₂ O ₅	0.07	0.06	0.09	0.08	0.09	0.04
LOI	1.50	0.94	1.43	1.25	1.14	2.85
TOTAL	99.89	99.87	99.89	99.9	99.88	99.88
K ₂ O+Na ₂ O	7.59	7.88	8.09	8.17	8.41	6.99
K ₂ O/Na ₂ O	1.21	0.76	1.73	1.59	1.75	1.76
A/CNK	1.17	1.07	1.10	0.76	1.14	1.17
Mg [#]	42	36	39	38	42	32
Akl	0.64	0.78	0.74	0.77	0.77	0.89
La	34.3	25.2	41.0	26.8	39.0	37.2
Ce	68.5	41.7	72.5	60.9	80.0	80.2
Pr	8.01	5.24	9.67	8.05	11.3	10.6
Nd	27.7	18.2	33.5	26.8	39.0	37.4
Sm	4.52	3.21	5.20	4.12	6.32	6.71
Eu	1.00	0.62	0.82	0.67	0.96	0.70
Gd	3.69	2.63	5.15	4.04	5.77	5.88
Tb	0.58	0.44	0.74	0.56	0.84	0.97
Dy	3.24	2.46	3.84	2.97	4.42	5.48
Ho	0.68	0.51	0.73	0.57	0.85	1.06
Er	1.98	1.53	1.95	1.54	2.36	2.84
Tm	0.37	0.27	0.36	0.31	0.43	0.53
Yb	2.21	1.73	2.51	2.00	2.94	3.44
Lu	0.46	0.38	0.47	0.42	0.53	0.87
Ga	21.4	16.1	16.5	16.7	17.0	18.6
Rb	175	106	179	196	198	224
Ba	569	635	327	368	376	421
Th	12.5	11.0	17.1	16.5	17.1	25.4
U	2.24	2.01	2.56	2.39	3.46	5.31
Nb	14.0	11.3	14.0	13.4	13.2	37.1
Ta	0.94	0.79	1.10	1.11	1.05	2.39
Sr	72.5	94.8	111	153	151	56.0
Zr	164	160	189	193	198	304
Hf	5.57	5.49	6.69	6.79	6.66	9.44
Y	19.3	14.6	19.9	15.6	22.1	23.9
ΣREE	156.80	103.80	178.17	139.36	194.31	193.28
LREE	143.96	94.15	162.78	127.28	176.60	172.74
HREE	12.84	9.65	15.39	12.08	17.71	20.54
LREE/HREE	11.21	9.76	10.58	10.54	9.97	8.41
δEu	0.74	0.64	0.48	0.51	0.48	0.34
(La/Yb) _N	10.22	9.59	10.77	8.84	8.73	7.12
(Gd/Yb) _N	1.34	1.22	1.64	1.62	1.57	1.37
Rb/Sr	2.41	1.12	1.61	1.28	1.31	4.00
Sr/Y	3.76	6.49	5.58	9.81	6.83	2.34
Nb/Ta	14.9	14.3	12.7	12.1	12.5	15.5
Zr/Hf	29.5	29.1	28.2	28.4	29.8	32.2
Th/U	5.58	5.47	6.68	6.90	4.94	4.78
Nd/Th	2.22	1.65	1.96	1.62	2.28	1.47

究表明, 准铝质至弱过铝质和过碱性花岗质岩浆中磷灰石的溶解度很低, 在岩浆演化的过程中总是优先结晶, 从而使得残余岩浆 P₂O₅ 含量越来越低, 而磷灰石在强过铝质花岗质岩浆中主要呈饱和态不

会优先结晶, 因此 S 型花岗岩的 P₂O₅ 随着 SiO₂ 的增加而增加或基本保持不变(Chappell, 1999; Xiao et al., 2009; 刘敬党等, 2015)。八大关地区早侏罗世流纹岩未见堇青石、石榴子石、矽线石等富铝矿物, 并且该区流纹岩石 P₂O₅ 和 SiO₂ 呈明显的负相关(图 8)与准铝质-弱过铝质 I 型和 A 型花岗岩非常相似, 因此可以初步推断八大关地区早侏罗世流纹岩为分异 I 型或 A 型。此外, 大多数流纹岩样品在 10000Ga/Al-Nb 和 Zr+Nb+Ce+Y-(K₂O+N₂O)/CaO 成因判别图解中分别落入 I 型和高分异 I 型(图 9)。因此可以确定八大关地区早侏罗世流纹岩为“I”型流纹岩。

如上所述, 八大关地区早侏罗世流纹岩为“I”型流纹岩, 元素地球化学分析表明, 岩石中 Th/U 比值(4.78~6.90, 平均 5.73)与下地壳的 Th/U 比值(6.00)相近, Rb/Sr 比值介于 1.12~4.00, 平均值为 1.96, 位于壳源岩浆范围(>0.5)内(Tischendorf and Paelchen, 1985), 而不同于原始地幔(0.03)、E-MORB(0.033)和 OIB(0.047)的 Rb/Sr 值(Sun and McDonough, 1989), 并且 Ti、P 显著亏损, Cr、Co、Ni 等相容元素和 Mg[#] 均较低(平均值<40), 这些地化特征均反映了岩浆来源于地壳, 而非地幔。此外, Nb/Ta 比值为 12.1~14.3, 平均值为 13.7, 大于下地壳(8.3)而小于亏损地幔(>17.0), Zr/Hf 比值变化范围为(28.2~32.2), 同样介于地壳平均值和地幔平均值之间, 推测岩浆形成过程中有幔源物质参与或者源岩来自地幔增生的基性下地壳物质。根据孙德有等(2011)对满洲里南部火山岩研究, 区内岩石 ε_{Nd}(t) 值均为正值, 模式年龄较为年轻 T_{DM2}=0.65~0.97 Ga, 与兴蒙造山带大面积出露的显生宙花岗岩及大兴安岭上库力组流纹岩的 Nd、Hf 模式年龄和 ε_{Hf}(t) 值(隋振民等, 2007)相一致, 表明源岩应该来自中新元古代从亏损地幔中增生的基性下地壳物质, 此外兴蒙造山带花岗岩的 ε_{Nd}(t) 值和 T_{DM} 变化范围不大, 暗示这些不同时代, 不同类型的岩石可能有一个相似的源区。因此笔者认为八大关地区早侏罗世流纹岩岩浆应该来源于中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。

研究区流纹岩 SiO₂ 含量较高且变化范围小, 且缺乏同时期的中基性火山岩, 因此, 八大关地区早侏罗世流纹岩 Eu 中等负异常、强烈亏损 Sr 不大可

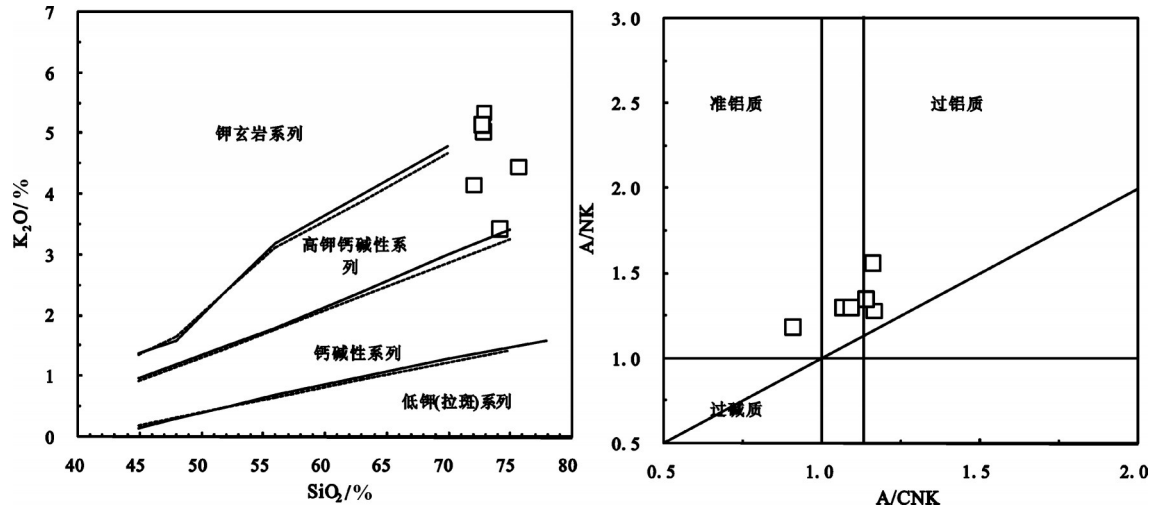


图5 八大关地区早侏罗世流纹岩 K₂O-SiO₂ 与 A/CNK-A/NK 图解
 Fig. 5 SiO₂-K₂O and A/CNK-A/NK diagrams of the Early Jurassic rhyolite of Badaguan

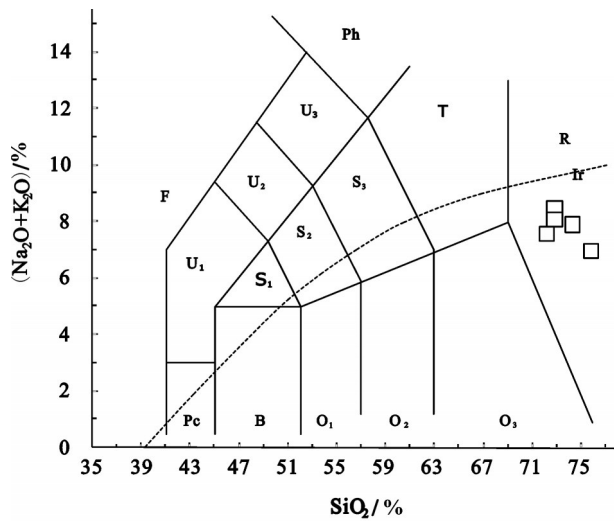


图6 八大关地区流纹岩 TAS 分类图
 Pc—苦橄玄武岩; B—玄武岩; O₁—玄武安山岩; O₂—安山岩; O₃—英安岩; R—流纹岩; S₁—粗面玄武岩; S₂—玄武质粗面安山岩; S₃—粗面安山岩; T—粗面岩、粗面英安岩; F—副长石岩; U₁—碱玄岩、碧玄岩; U₂—响岩质碱玄岩; U₃—碱玄岩

Fig. 6 TAS diagram of rhyolite in Badaguan
 Pc—Picrite; B—Basalt; O₁—Basaltic andesite; O₂—Andesite; O₃—Dacite; O₄—Rhyolite; S₁—Trachybasalt; S₂—Basaltic trachyandesite; S₃—Trachyandesite; T—Trachyte, Trachydacite; F—Secondary feldspar; U₁—Tephrite, asanite; U₂—Phonolitic basalt; U₃—Basanite

能是由中基性火山岩浆经历斜长石分异所致, 而可能是源区残留斜长石的原因。由于石榴石强烈富集 HREE, 角闪石相对富集 MREE, 样品中 MREE 相

对于 HREE 略微亏损, 暗示岩浆源区可能含有少量角闪石, 不含石榴子石。根据张旗等(2011, 2014)研究, 可以按照 Sr 和 Yb 的含量将花岗岩分为 5 类, 其中在岩浆来源较浅(<40 km), 压力较低(<0.8 Gpa)情况下形成的花岗岩具有低 Sr 高 Yb 的特点, 源区残留相由斜长石和角闪石组成。结合地球化学特征认为研究区流纹岩可能与低 Sr 高 Yb 花岗岩的形成条件类似, 源区残留相由斜长石和角闪石组成。综上所述, 本文认为八大关地区早侏罗世流纹岩为“T”型流纹岩, 岩浆来源于中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。源区残留物以斜长石为主, 含少量角闪石, 无石榴子石。

5.3 火山岩的构造背景

前已叙述, 目前关于大兴安岭地区中生代火山岩构造背景争议主要在于以下 3 个方面:(1)与地幔柱活动有关(葛文春等, 2000b);(2)与蒙古—鄂霍茨克洋演化有关(Meng et al., 2006; Wang et al., 2006, 陈志广等, 2006; 张连昌等, 2007);(3)古太平洋板块俯冲到欧亚大陆板块之下形成的陆缘环境(Wang et al., 2006; Zhang et al., 2006, 2010; 陈丽丽等, 2015)。但随着近年来对大兴安岭及其邻区研究的不断深入, 积累了精确的火山岩年龄数据和建立了系统的年代学格架, 早前所认为的环状火山岩带并不存在, 火山岩形成的时代具有较大的变化范围并显示自西向东逐渐变新的趋势, 同时大兴安岭地区

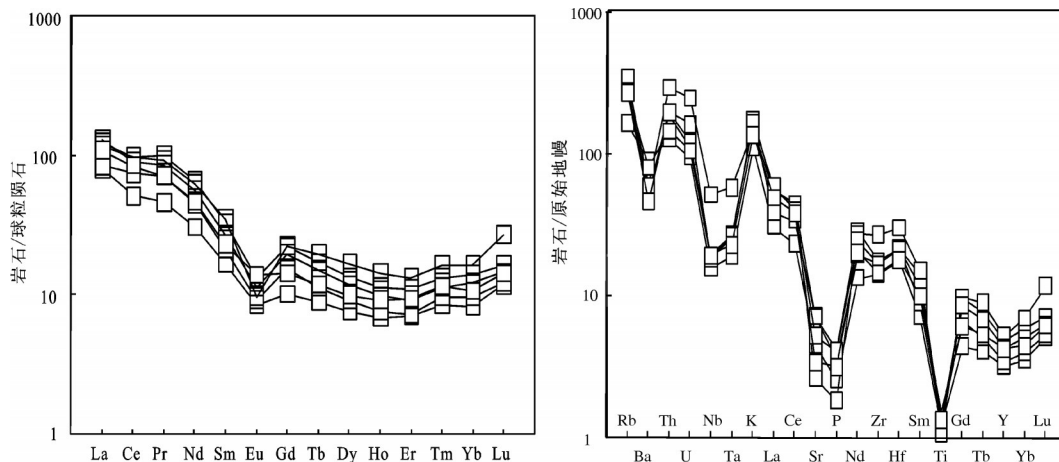


图7八大关地区花岗岩稀土元素配分模式图和微量元素蛛网图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE pattern and primitive mantle-normalized spidergram of Early Jurassic rhyolite from Badaguan

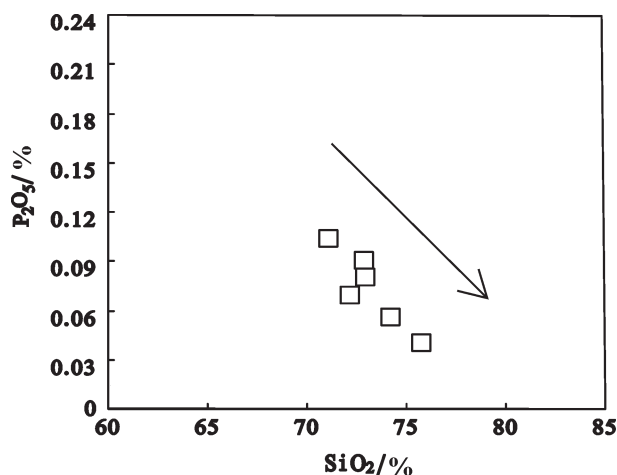


图8八大关地区流纹岩 SiO_2 - P_2O_5 相关关系图

Fig. 8 P_2O_5 versus SiO_2 variation diagrams showing that the rhyolite follows the trend of I-type

缺乏OIB型玄武质岩石,这与地幔柱活动的特点完全不吻合。此外,另有学者在小兴安岭—张广才岭发现了一套早侏罗世镁铁质—超镁铁质侵入岩与同时期的花岗质岩石构成典型的双峰式火山岩组合,揭示了一种伸展环境,由此可见,八大关地区早侏罗世流纹岩的形成与古太平洋板块的俯冲无关。并且在满洲里—额尔古纳地区发现的一套早—中侏罗世二长花岗岩和正长花岗岩的组合,其成因为蒙古—鄂霍茨克洋向南东方向俯冲于额尔古纳地块之下的产物(陈志广等, 2010)。且在更大的区域

中,早中生代花岗质岩浆事件广泛分布于蒙古—鄂霍茨克缝合带西侧、额尔古纳地块、以及俄罗斯远东地区,这些岩浆事件都与蒙古—鄂霍茨克洋的演化有关(赵国龙等, 1989; Sorokin et al., 2010, 2011)。八大关地区早侏罗世流纹岩在 $(\text{Y}+\text{Nb})-\text{Rb}$ 和 $(\text{Yb}+\text{Ta})-\text{Rb}$ 判别图解上全部落入火山弧区(图10),反映其可能形成于与俯冲作用有关的构造背景(梁玉伟等, 2013; 祝新友等, 2016),基于以上分析结果与区域构造演化史,表明早侏罗世期间仍然存在蒙古—鄂霍茨克大洋板块向额尔古纳地块之下的俯冲作用。额尔古纳地块北缘处于活动大陆边缘构造环境。

6 结 论

(1)大兴安岭北段八大关地区流纹岩形成于185~190 Ma的早侏罗世,而非前人所认为的晚侏罗世。

(2)大兴安岭北段八大关地区早侏罗世流纹岩元素地球化学具有壳源岩浆和I型花岗岩的特征,岩浆源区为中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,源区残留相主要为斜长石,含少量角闪石,无石榴子石。

(3)大兴安岭北段八大关地区早侏罗世流纹岩形成于蒙古—鄂霍茨克洋板块俯冲的活动大陆边缘环境。

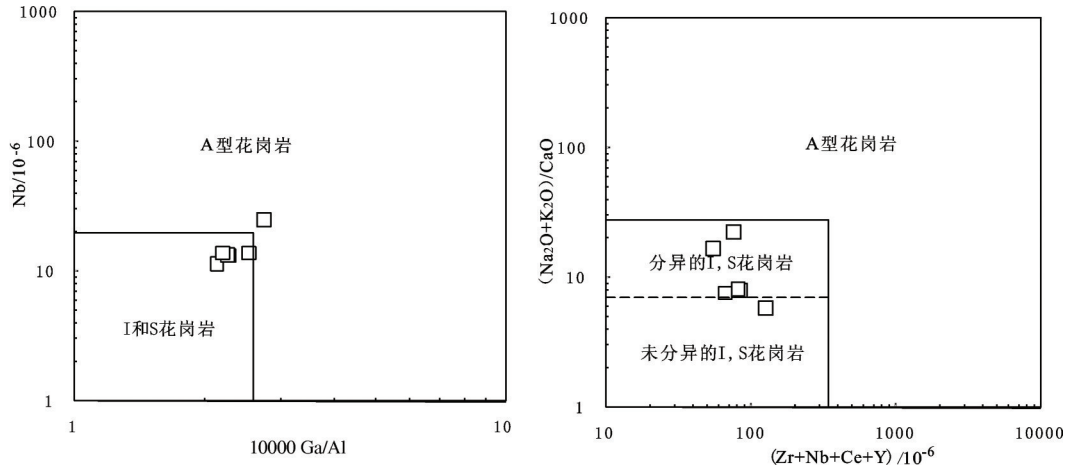


图9 八大关地区早侏罗世流纹岩成因判别图解

Fig. 9 Discrimination diagram of genetic types for Early Jurassic rhyolite from Badaguan

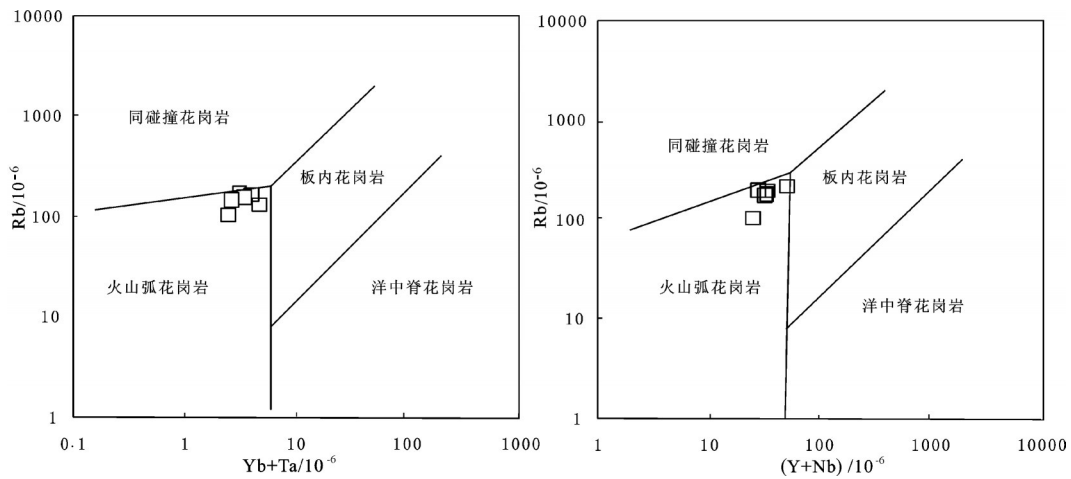


图10 八大关地区早侏罗世流纹岩构造环境判别图解(据 Pearce et al.,1984)

Fig. 10 Tectonic setting for Early Jurassic rhyolite of Badaguan (after Pearce et al.,1984)

致谢:衷心感谢核工业二四〇研究所、审稿专家及编辑老师在论文撰写和修改的过程中给予的大力支持与帮助。

注释

① 核工业二四〇研究所.2015.1:5 万八大关牧场等六幅区域地质调查报告[R].

References

Chen Zhiguang, Zhang Lianchang, Zhou Xinhua, Wan Bo, Ying Jifeng, Wang Fei. 2006. Geochronology and geochemical characteristics of volcanic section rocks in Manzhouli Xinyouqi, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(12): 2971-2986(in

Chinese with English abstract).

Chen Zhiguang, Zhang Lianchang, Lu Baizhi, Li Zhanhua, Wu Yinghua, Xiang Peng, Huang Shiwu. 2010. Geochronology and geochemistry of the Taipingchuan copper-molybdenum deposit in Inner Mongolia, and its geological significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(5): 1437-1449 (in Chinese with English abstract).

Chen Lili, Cheng Zhiguo. 2015. Petrology and zircon chronology of the Dorolj in Hinggan League, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 42(4): 891-908 (in Chinese with English abstract).

Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. Lithos, 46: 535-551.

Ge Wenchun. 1997. Geochemistry of Mesozoic Volcanic Rocks and Tectonic Setting in Daxing'Anling[D]. Changchun: Changchun

- University of science and technology, 1–77 (in Chinese with English abstract).
- Ge Wenchun, Lin Qiang, Sun Deyou, Wu Fuyuan, Li Xianhua. 2000b. Geochemical research into origins of two types of mesozoic rhyolites in Daxing' Anling[J]. Earth Science– Journal of China University of Geosciences, 25(2): 172–178 (in Chinese).
- Ge Wenchun, Li Xianhua, Lin Qiang, Sun Deyou, Wu Fuyuan, Yin Chengxiao. 2001. Geochemistry of early cretaceous alkaline rhyolites from Hulun Lake, Daxing'Anling and its tectonic implications[J]. Chinese Journal of Geology, 36(2): 176–183(in Chinese with English abstract).
- Hou Zhaoshuo, Ren Yunsheng, Wangxi, Sun Deyou, Gou Jun, Wang Tianhao. 2013. Geologic feature and fluid inclusion of NO. 431 urauium deposit in Erguna Area, Inner Mongolia[J]. Geology and Resources, 22: 180–184(in Chinese with English abstract).
- Jiang Guoyuan, Quan Huan. 1988. Mesozoic volcanic rocks of Genhe and Hailaer Basins in Da Xing'an Range[J]. Shenyang Insitiate of Geology and Minral Resovers, 17: 23–100(in Chinese).
- Lin Qiang, Ge Wenchun, Cao Lin, Sun Deyou, Lin Jingguo. 2003. Geochemistry of Mesozoic volcanic rocks in Daxing'Anling: Thebimodal volcanic rocks[J]. Geochimic, 32(3): 208–222(in Chinese with English abstract).
- Liang Yuwei, Yu Cunlin, Shen Zhenguo, Sun Qingru, Li Jinwen. 2013. Geochemical characteristics of granites in the Suonaga Pb–Zn–Ag deposit of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and their tectonic and ore–forming implications[J]. Geology in China, 40(3): 767–779(in Chinese with English abstract).
- Liu Jingdang, Liang Shuai, Xiao Rongge, Zhang Yanfei. 2015. Geochemistry, geochronology and petrogenesis of the ore – forming intrusive body in the Baoyintumolybdenum deposit, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 42(1): 149–168(in Chinese with English abstract).
- Meng Q R. 2003. What drove Late Mesozoic extension of the northern China–Mongolia tract [J]. Tectonophysics, 369: 155–174.
- Pearce J A, Harris N B L and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 25: 956–983.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process. [C]// Sauders A D, Norry M J (eds). Magmatism in the Ocean Basins[J]. Geological Society Special Publication, 42: 313–326.
- Sorokin Andrey A, Kudryashov N M. and Kotov, A B. 2007. Age and geochemistry of the Early Mesozoic granitoid massifs of the southern Bureya terrane of the Russian Far East[J]. Russian Journal of Pacific Geology 1(5): 454–463.
- Sui Zhenmin, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhangjiheng, Xu Xuechun, Cheng Ruyu. 2007. Zircon U– Pb ages, geochemistry and its petrogenesis of Jurassic granites in northeastern part of the Da Higgans Mts[J]. Acta Petrologica Sinica. 23(2): 461–480(in Chinese with English abstract).
- Sorokin Andrey A, Kotov Alexander B, Sal'nikova, Ekaterina. 2010. Granitoids of the Tyrma–Bureyacomplex in the northern Bureya–Jiamusi superterrane of the Central Asian fold belt: Age and geodynamic setting[J]. Russian Geology and Geophysics, 51(5): 563–571.
- Sun Deyou, Gou Jun, Ren Yunsheng, Fu Changliang, Wang Xi, Liu Xiaoming. 2011. Zircon U– Pb dating and study on geochemistry of volcanic rocks in Manitu Formation from southern Manchuria, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 10: 3083–3094(in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou, GouJun, Wang Tianhao, Ren Yunsheng, LiuYongjiang, Guo Hongyu. Liu Xiaoming, Hu Zhaochun. 2013. Geochronological and geochemical constraints on the Erguna massif basement, NE China–subduction history of the Mongol– Okhotsk oceanic crust[J]. International Geology Review 55(14): 1–16.
- Sun Chongbo, Li Zhongquan, Wang Daoyong, Xu Yuanping, Li Youyu. 2016. Petrogeochemistry and zircon U–Pb chronology of the Niuzhi monzonitic porphyry in southern segment of Ailao Mountain tectonic belt[J]. Geology in China, 43(1): 111–119(in Chinese with English abstract).
- Tischendorf G, Paelchen W. 1985. Zur Klassifikation von Granitoiden[J]. Classification of Granitoids Zeitschrift Fuer Geologische Wissenschaften, 13(5): 615–627.
- Wu Fuyuan, Jahn Bor– ming, Wilde Simon A, Lo Chinghua, Lin Qiang, Ge Wenchun, Sun Deyou. 2003. Highly Fractionated I–type Granites in NE China (I): Geochronology and Petrogenesis[J]. Lithos, 66(3): 241–273.
- Wang P J, Chen F K, Shen S M. 2006. Geochemical and Nd– Sr– Pb isotopic composition of Mesozoic volcanic rocks in the Songliaobasin, NE China[J]. Geochemical Journal, 40: 149–159.
- Wang Fei, Zhou Xinhua, Zhang Lianchang, Yang Jinhui, Wilde Simon A, Li Ming. 2006. 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, 251: 179–198.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Ge Wenchun, Zhang Yanbin, Grant Matthew L, Wilde Simon A, Jahn Bor– ming, Hu Zhaochun. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences 41, 1–30.
- Wu Pengfei, Sun Deyou, Wang Tianhao, Gou Jun, Li Rong, Liu Wei, Liu Xiaoming. 2013. Chronology, geochemical characteristic and petrogenesis analysis of diorite in Helong of Yanbian area, NE China[J]. Geological Journal of China Universities, 19(4): 600–610 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei. 2014. Geochronology and Geochemistry of the Early Jurassic Volcanic Rocks in the Manzhouli– Erguna Area, NE China. Inner Mongolia[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B F, Huang B C. 2009. End Permian to mid– Triassic termination of the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. International Journal of Earth Sciences, 98, 1189–1217.
- Ying Jifeng, Zhou Xinhua, Zhang Lianchang. 2010. Geochronological

- framework of Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing' an Range, NE China, and their geodynamic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(6): 786-793.
- Zhao Guolong, Yang Guilin, Wang Zhong. 1989. Mesozoic Volcanic Rocks in South Central [M]. Beijing: Science Press, 1-35 (in Chinese).
- Zhang Jiheng, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Liu Xiaoming. 2006. Mesozoic bimodal volcanic suite in Zhalantun of the Da Hinggan Range and its geological significance: Zircon U-Pb age and Hf isotopic constraints[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 58-69.
- Zhang Lianchang, Chen Zhiguang, Zhou Xinhua, Ying Jifeng, Zhang Yutao. 2007. Characteristics of deep sources and tectonic-magmatic evolution of the early Cretaceous volcanics in Genhe area. Da-Hinggan Mountains: Constraints of Sr-Nd-Pb-Hf isotopic geochemistries[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2823-2835 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yutao, Zhang Lianchang, Ying Jifeng, Wang Fei, Hou Quanlin, Liu Qing. 2007. Geochemistry and source characteristics of early Cretaceous volcanic rocks in Tahe, north Da Hinggan Mountain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2811-2822 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiheng, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Wilde Simon A., Yang Huijin, Liu Xiaoming. 2008. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing' an Range, Northeastern China [J]. *Lithos*, 102: 138-157.
- Zhang Jiheng, Gao Shan, Ge Wenchun. 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing' an Range, northeastern China: Implications for subduction-induced delamination[J]. *Chemical Geology*, 276: 144-165.
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, Wang Wenlong. 2011. Granitic rocks and their formation depth in the crust[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(2): 259-269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 2014. Geochemistry of the Guangxi-type granite and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33 (1): 199-210 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Zhang Zhihui, Fu Xu, Li Baiyang, Wang Yanli, Jiao Shoutao, Sun Yalin. 2016. Geological and geochemical characteristics of the Weilasito Sn-Zn deposit, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 43(1): 188-208 (in Chinese with English abstract).
- 造背景[D]. 博士学位论文. 长春: 长春科技大学, 1-77.
- 葛文春, 林强, 孙德有, 吴福元, 李献华. 2000. 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*, 25(2): 172-178.
- 葛文春, 李献华, 林强, 孙德有, 吴福元, 尹成孝. 2001. 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*, 36 (2): 176-183.
- 侯召硕, 任云生, 王晰, 孙德有, 苟军, 王天豪. 2013. 内蒙古额尔古纳地区431铀矿床地质特征与流体包裹体研究[J]. *地质与资源*, 22, 180-184.
- 蒋国源, 权恒. 1988. 大兴安岭根河、海拉尔盆地中生代火山岩[J]. *中国地质科学院沈阳地质矿产研究所刊*. 17: 23-100.
- 林强, 葛文春, 曹林, 孙德有, 林经国. 2003. 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*, 32(3): 208-222.
- 隋振民, 葛文春, 吴福元, 张吉衡, 徐学纯, 程瑞玉. 2007. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩类岩石的锆石U-Pb年龄、地球化学特征及成因[J]. *岩石学报*, 23(2): 461-480.
- 梁玉伟, 余存林, 沈国珍, 孙庆茹, 李进文. 2013. 内蒙古东乌旗索纳嘎铅锌银矿区花岗岩地球化学特征及其构造与成矿意义[J]. *中国地质*, 40, 3, 767-779.
- 刘敬党, 梁帅, 肖荣阁, 张艳飞. 2015. 内蒙古宝音图铀矿成矿岩体地球化学、年代学及成因研究. *中国地质*, 242(1): 149-168.
- 孙德有, 苟军, 任云生, 付长亮, 王晰, 柳小明. 2011. 满洲里南部玛尼吐组火山岩锆石U-Pb年龄与地球化学研究[J]. *岩石学报*, 10: 3083-3094.
- 孙崇波, 李忠权, 王道永, 许远平, 李友余. 2016. 哀牢山构造带南段扭只二长花岗斑岩地球化学特征及其锆石U-Pb年代学研究[J]. *中国地质*, 43(1): 111-119.
- 武鹏飞, 孙德有, 王天豪, 苟军, 李蓉, 刘伟, 刘小明. 2013. 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*, 19(4): 600-610.
- 王伟. 2014. 满洲里-额尔古纳地区早侏罗世火山岩的年代学与地球化学研究[D]. 硕士学位论文. 长春, 吉林大学, 1-57.
- 赵国龙, 杨桂林, 王忠. 1989. 中南部中生代火山岩[M]. 北京: 北京科学技术出版社. 1-35.
- 张玉涛, 张连昌, 英基丰, 周新华, 王非, 侯泉林, 刘庆. 2007. 大兴安岭北段塔河地区早白垩世火山岩地球化学及源区特征[J]. *岩石学报*, 23(11): 2811-2822.
- 张连昌, 陈志广, 周新华, 英基丰, 王非, 张玉涛. 2007. 大兴安岭根河地区早白垩世火山岩深部源区与构造-岩浆演化: Sr-Nd-Pb-Hf同位素地球化学制约[J]. *岩石学报*, 23(11): 2823-2835.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 王元龙. 2006. 三论花岗岩按照Sr-Yb的分类: 应用[J]. *岩石学报*, 26(12): 3431-3455.
- 张旗. 2014. 广西型花岗岩的地球化学特征及其构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 33 (1): 199-210.
- 祝新友, 张志辉, 付旭, 李柏阳, 王艳丽, 焦守涛, 孙雅琳. 2016. 内蒙古赤峰维拉斯托大型锡多金属矿的地质地球化学特征[J]. *中国地质*, 43(1): 188-208.

附中文参考文献

- 陈志广, 张连昌, 周新华, 万博, 英基丰, 王非. 2006. 满洲里新右旗火山岩剖面年代学和地球化学特征[J]. *岩石学报*, 22(12): 2971-2986.
- 陈志广, 张连昌, 卢百志, 李占龙, 吴华英, 相鹏, 黄世武. 2010. 内蒙古太平川铜铅矿成矿斑岩时代地球化学及地质意义[J]. *岩石学报*, 26(5): 1437-1449.
- 陈丽丽, 程志国. 2015. 内蒙古兴安盟杜尔基地区花岗岩岩石学及锆石U-Pb年龄[J]. *中国地质*, 42(4): 891-908.
- 葛文春. 1997. 大兴安岭中生代火山岩的地球化学特征及其大地构