

东北三江盆地始新世花岗闪长岩的发现及其地质意义：锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素证据*

王智慧 杨浩 葛文春** 毕君辉 张彦龙 许文良

WANG ZhiHui, YANG Hao, GE WenChun**, BI JunHui, ZHANG YanLong and XU WenLiang

吉林大学地球科学学院, 长春 130061

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

2016-01-20 收稿, 2016-03-21 改回.

Wang ZH, Yang H, Ge WC, Bi JH, Zhang YL and Xu WL. 2016. Discovery and geological significance of the Eocene granodiorites in the Sanjiang basin, NE China: Evidence from zircon U-Pb chronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 32(6):1823–1838

Abstract This paper presents zircon LA-ICP-MS U-Pb ages, whole-rock geochemical, whole-rock Sr-Nd and zircon Hf isotopic data of the Linshan hornblende-bearing granodiorites at Fujin in the Sanjiang basin, NE China, to constrain their emplacement age, magmatic sources, petrogenesis and tectonic setting. Zircons grains from these granodiorites are euhedral-subhedral in shape, display fine-scale oscillatory growth zoning with high Th/U ratios of 0.31 ~ 1.92, indicating a magmatic origin. U-Pb dating results give the emplacement age of about 54Ma for the granodiorites, which records the youngest granitic magmatic event in the NE China. The granodiorite have high SiO₂ contents of 68.71% ~ 72.42%, Na₂O concentrations of 3.29% ~ 4.41%, and K₂O abundances of 2.79% ~ 3.47%, with Na₂O/K₂O ratios of 0.95 ~ 1.58 and A/CNK values of 0.99 ~ 1.12. They are enriched in light rare earth elements (LREEs) and large ion lithophile elements (LILEs), and depleted in heavy rare earth element (HREEs) and high field strength elements (HFSEs), with (La/Yb)_N ratios of 21.8 ~ 34.1. No obvious negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.84 \sim 1.19$) have been identified. They have (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i ratios of 0.7068 ~ 0.7071 and $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of -2.4 to -2.3. Zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values range from +1.7 to +5.7, with model ages (t_{DM2}) of 765 ~ 1020Ma. Collectively, it is suggested that these granodiorites chemically belong to weak peraluminous and high-K calc-alkaline I-type ones, and their primary magma could be derived from partial melting of Late Mesoproterozoic to Neoproterozoic crustal material. The summary and spatio-temporal compare of zircon Hf isotope data in the Sanjiang basin and the east part of the Jiamusi Massif, suggest that the Sanjiang basin and the east part of Jiamusi Massif have similar history of crustal growth. Therefore, we argue that the basement of the Sanjiang basin may be one part of the Jiamusi Massif. In addition, the identification of the Cenozoic Linshan pluton constrains that the timing of formation of the Fujin uplift should be the Eocene, not the Mesozoic as previously suggested.

Key words Eocene granodiorites; Zircon U-Pb age; Geochemistry; Basement of Sanjiang basin; Fujin uplift

摘要 本文报道了三江盆地富锦地区临山花岗质岩体的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、全岩地球化学和 Sr-Nd 同位素与锆石 Hf 同位素资料,以确定其形成时代、岩石成因、源区性质及其构造属性。花岗闪长岩中的锆石均呈半自形-自形晶,震荡环带发育, Th/U 比值 = 0.31 ~ 1.92, 指示其岩浆成因。对岩浆锆石的定年结果显示, 临山花岗闪长岩形成于 ~54Ma, 这是目前东北地区报道的最年轻的花岗质岩浆作用。该期花岗闪长岩的 SiO₂ 含量主要在 68.71% ~ 72.42% 之间, Na₂O = 3.29% ~ 4.41%, K₂O = 2.79% ~ 3.47%, Na₂O/K₂O = 0.95 ~ 1.58, A/CNK = 0.99 ~ 1.12; 该区花岗闪长岩富集轻稀土元素 (LREEs) 和大离子亲石元素 (LILEs), 亏损重稀土元素 (HREEs) 和高场强元素 (HFSEs), 且轻重稀土元素分馏较强 [(La/Yb)_N = 21.8 ~ 34.1]。样品无明显 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.84 \sim 1.19$)。它们的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i = 0.7068 ~ 0.7071, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于 -2.4 ~ -2.3 之间; 锆石

* 本文受国家自然科学基金项目(41472050, 41330206)资助。

第一作者简介: 王智慧, 女, 1987 年生, 博士生, 地球化学专业, E-mail: wangzh12@mails.jlu.edu.cn

** 通讯作者: 葛文春, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 岩石学专业, E-mail: gewenchun@jlu.edu.cn

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 +1.7 ~ +5.7 之间, 二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 介于 765 ~ 1020 Ma 之间。上述特征表明, 该期花岗闪长岩属于弱过铝质高钾钙碱性 I 型花岗岩, 其原始岩浆起源于中元古代末-新元古代期间增生的陆壳物质的部分熔融。对三江盆地与佳木斯地块东缘已发表锆石 Hf 同位素资料进行总结和时空对比发现, 佳木斯地块东缘和三江盆地具有相似的地壳增生历史, 暗示三江盆地之下的基底物质可能仍归属于佳木斯地块范畴。另外, 新生代临山岩体的识别, 限制了富锦隆起的时限为始新世之后, 并非前人认为的中生代。

关键词 始新世花岗闪长岩; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 三江盆地基底; 富锦隆起

中图法分类号 P588.122; P597.3

中国东北位于中亚造山带的东段 (Şengör *et al.*, 1993), 区域上分布着巨量花岗质岩石 (吴福元等, 1999), 传统上将其形成时代视为海西期 (吉林省地质矿产局, 1988; 内蒙古自治区地质矿产局, 1991; 黑龙江省地质矿产局, 1993)。然而, 最近发表的大量高精度年龄结果显示该区花岗岩主要形成于中生代, 只有少量形成于早-晚古生代 (葛文春等, 2005; Wu *et al.*, 2011; 余宏全等, 2012; Zhao *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2012) 和新元古代 (Tang *et al.*, 2013)。目前, 东北地区中生代及以前花岗质岩浆作用的年代学格架已初步建立, 那么, 该区是否存在新生代花岗岩? 虽然在俄罗斯远东地区已有新生代花岗岩的报道 (Jahn *et al.*, 2015; Tang *et al.*, 未发表), 但在我国境内还没有新生代花岗岩的报道。近年来, 随着油气勘探由松辽盆地向外围盆地的转移, 三江盆地以面积大、地层埋藏深、保存好, 被作为重点靶区开展了初步的研究工作。虽然有一些三江盆地北缘早二叠世和晚白垩世侵入岩的报道并对其构造意义进行了初步的探讨 (于介江等, 2013a, b, c), 但关于三江盆地基底组成和构造属性, 以及富锦隆起时限等问题尚缺乏有效制约, 导致认识上存在很大争议 (刘杰等, 2004; 赵霞等, 2007; 章倩倩, 2012; 张海东等, 2015)。本文报道了三江盆地富锦地区新生代花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄、全岩主、微量和 Sr-Nd 同位素以及锆石 Hf 同位素分析结果, 这对揭示东北地区新生代的构造演化以及讨论三江盆地基底属性具有重要意义。

1 区域地质背景及样品描述

中国东北地区位于中亚造山带东部, 古生代期间, 该区具有多块体拼合的构造属性, 自西北至东南依次为额尔古纳地块、兴安地块、松辽地块和佳木斯-兴凯地块 (Şengör *et al.*, 1993; Yu *et al.*, 2014)。中生代早期, 古亚洲洋洋盆已经完成闭合, 东北地区开始受到后造山伸展、古太平洋和蒙古-鄂霍次克古大洋三种构造机制的叠加作用 (Meng *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2009, 2013; Yu *et al.*, 2012; Tang *et al.*, 2014, 2016)。中生代晚期 (早白垩世早期) 那丹哈达地体拼贴于佳木斯地块东缘 (Zhou *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015)。三江盆地位于佳木斯地块和那丹哈达地体的衔接部位, 处在伊通-依兰断裂带和密山-敦化断裂带之间, 向北与俄罗斯境内的中阿穆尔盆地相连 (图 1a)。盆地自西向东分为绥滨拗陷、富锦隆起、前进拗陷等三个一级构造单元。传统认为, 该

盆地的基底可以区分出性质不同的三个区 (黑龙江省地质矿产局, 1993); 西部主要由元古宙的兴东群、麻山群变质岩系和古生代花岗岩组成; 中部主要由上古生界和早中生代花岗岩组成; 东部由三叠系-下侏罗统深海相硅质、泥质页岩、浊积岩及中生代花岗岩组成。其中西部和东部的基底组成分别与佳木斯地块和那丹哈达地体发育的地层岩石组合类似, 表明该盆地具有复合基底性质 (程瑞玉等, 2006; 黑龙江省地质矿产局, 1993; 周建波, 2009; 章凤奇等, 2012; 于介江等, 2013a)。自早-晚侏罗世以来, 该盆地接受了数千千米的海相-海陆交互相-陆相沉积, 形成的含煤碎屑岩建造角度不整合于基底之上 (黑龙江省地质矿产局, 1993; 章凤奇等, 2012; 章倩倩, 2012)。

临山花岗质岩体位于黑龙江省富锦市东约 15 km 的乌尔古力山西北部, 属于三江盆地中间部分。在此之前, 黑龙江省地质矿产局将临山岩体所在区域笼统划分为晚古生代地层范畴 (黑龙江省地质矿产局, 1997)。通过详细的野外地质调查发现, 该岩体出露规模不大, 侵入到上石炭统至下二叠统珍子山组 (C_2-P_1z) (图 1b; 黑龙江省地质矿产局, 1997), 发育岩石类型单一, 均为中细粒含角闪石黑云母花岗闪长岩。

中细粒含角闪石黑云母花岗闪长岩呈中细粒半自形粒状结构和块状构造。主要矿物成分为石英 (25% ~ 30%) + 斜长石 (50% ~ 55%) + 碱性长石 (10% ~ 15%) + 黑云母 (5% ~ 7%) ± 普通角闪石 (< 3%)。其中石英呈他形粒状, 波状消光; 斜长石多呈半自形柱状, 发育聚片双晶和环带结构 (图 2a); 碱性长石可见条纹结构; 黑云母多呈片状, 局部发育绿泥石化蚀变; 普通角闪石可见其两组近 60° 解理 (图 2b), 局部因蚀变转化成绿泥石和黑云母。副矿物主要有磷灰石、锆石、榍石, 偶见少量磁铁矿等不透明矿物。

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 定年

用于 U-Pb 测年的样品 (10GW247、11GW248) 均采自野外天然露头。样品在河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司采用常规方法进行粉碎, 然后用电磁选方法对其进行分选, 在双目镜下挑选出晶形较好、透明且无明显裂痕的锆石颗粒置于双面胶上, 灌上环氧树脂制靶, 将其固化并打磨剖光, 使锆石内部的结构露出, 用于反射光、透射光和

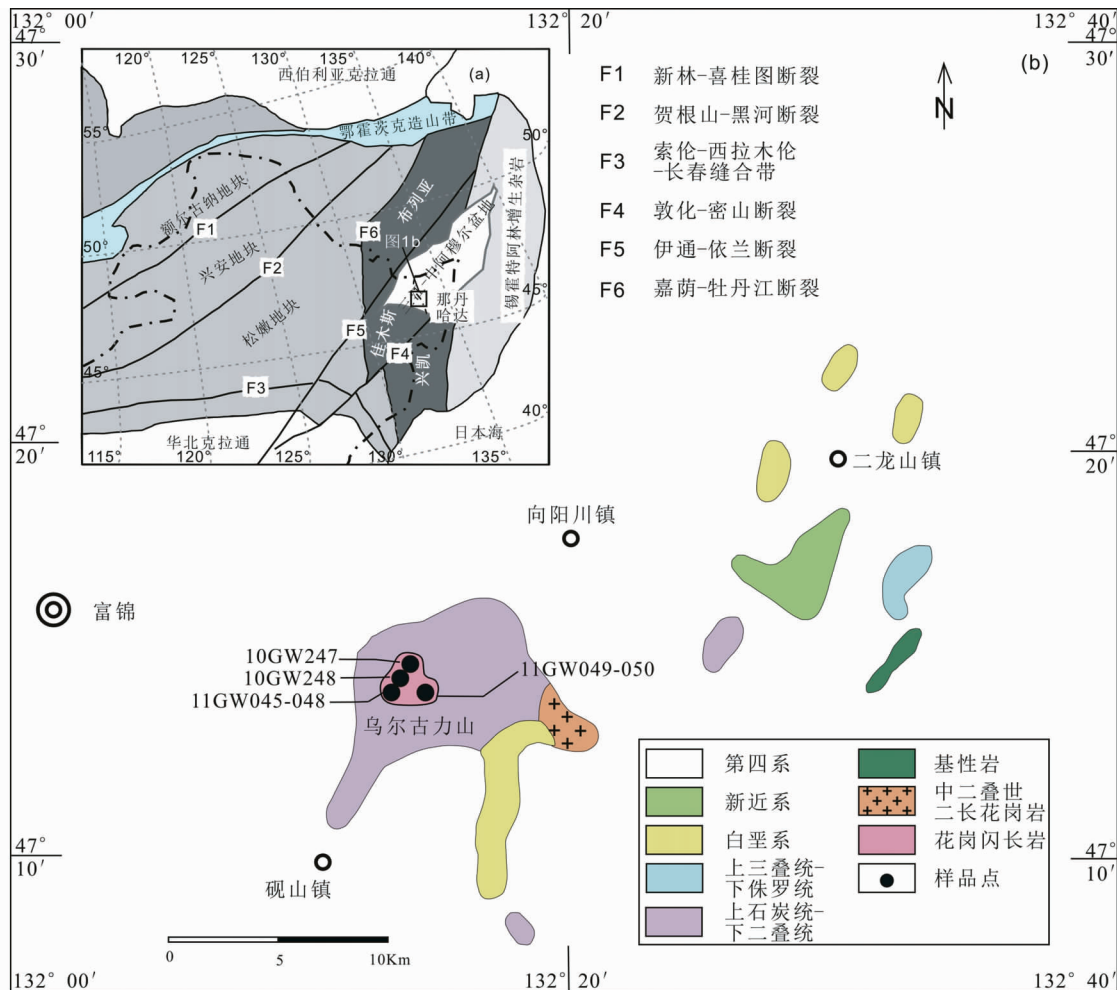


图1 东北及邻区构造图(a,据 Wu *et al.* , 2007)和研究区地质简图(b,据黑龙江省地质矿产局, 1997)
 Fig.1 Tectonic map of Northeast China and its adjacent area (a, after Wu *et al.* , 2007) and geological sketch map of the study area (b, after BGMRH, 1997)

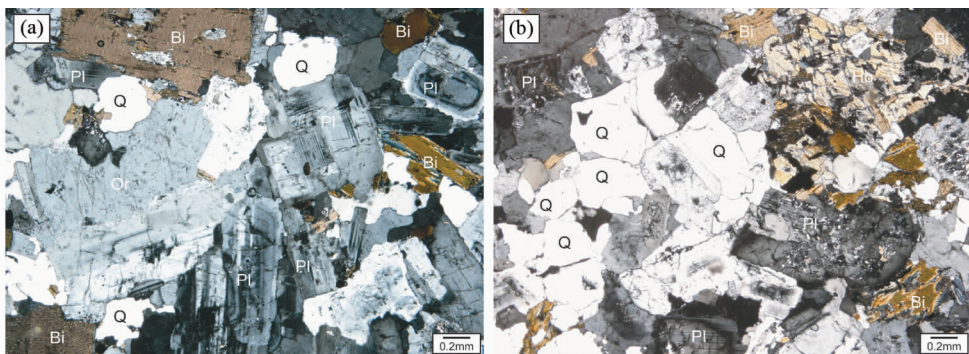


图2 临山花岗岩闪长岩的显微照片
 Fig.2 Photomicrographs of Linshan granodiorites
 Hb-homblende; Bi-biotite; Or-orthoclase; Pl-plagioclase; Q-quartz

阴极发光 (CL) 图像的采集以及锆石原位微区单点 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析。锆石的 CL 图像在北京大学物理学院电镜室的阴极荧光分析系统上完成。样品靶的制备和锆

石 U-Pb 同位素测试是在中国地质大学 (北京) 地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。用于锆石 U-Pb 测试的仪器是由美国 New Wave Research Inc. 公司生产的激光剥蚀进样系

表1 始新世花岗闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for the Eocene granodiorites

测点号	含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						年龄(Ma)			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
10GW247														
10GW247 01	7.19	780	661	1.18	0.0480	0.0010	0.0546	0.0011	0.0083	0.0002	54	1	53	1
10GW247 02	7.69	777	691	1.12	0.0482	0.0016	0.0564	0.0017	0.0085	0.0002	56	2	54	1
10GW247 03	9.39	635	927	0.69	0.0522	0.0014	0.0609	0.0015	0.0085	0.0002	60	1	54	1
10GW247 04	9.81	904	873	1.04	0.0511	0.0046	0.0569	0.0049	0.0081	0.0002	56	5	52	1
10GW247 05	7.69	668	731	0.91	0.0480	0.0010	0.0546	0.0011	0.0083	0.0002	54	1	53	1
10GW247 06	6.82	476	678	0.70	0.0479	0.0013	0.0551	0.0014	0.0083	0.0002	54	1	53	1
10GW247 07	8.55	984	768	1.28	0.0510	0.0010	0.0571	0.0011	0.0081	0.0002	56	1	52	1
10GW247 08	4.67	169	504	0.34	0.0470	0.0011	0.0550	0.0012	0.0085	0.0002	54	1	55	1
10GW247 09	8.47	734	769	0.95	0.0471	0.0032	0.0548	0.0035	0.0084	0.0002	54	3	54	1
10GW247 10	5.85	825	430	1.92	0.0516	0.0015	0.0590	0.0016	0.0083	0.0002	58	2	53	1
10GW247 11	6.93	440	688	0.64	0.0461	0.0019	0.0534	0.0019	0.0084	0.0002	53	2	54	1
10GW247 12	2.82	210	266	0.79	0.0498	0.0019	0.0578	0.0021	0.0084	0.0002	57	2	54	1
10GW247 13	14.35	1928	1053	1.83	0.0510	0.0009	0.0615	0.0010	0.0087	0.0002	61	1	56	1
10GW247 14	9.11	923	788	1.17	0.0461	0.0030	0.0515	0.0031	0.0081	0.0002	51	3	52	1
10GW247 15	9.41	707	892	0.79	0.0461	0.0025	0.0538	0.0026	0.0085	0.0002	53	3	54	1
10GW247 16	8.59	452	860	0.53	0.0502	0.0009	0.0603	0.0011	0.0087	0.0002	59	1	56	1
10GW247 17	6.13	468	567	0.82	0.0459	0.0013	0.0543	0.0015	0.0086	0.0002	54	1	55	1
10GW247 18	4.57	292	456	0.64	0.0478	0.0013	0.0552	0.0014	0.0084	0.0002	55	1	54	1
10GW247 19	3.48	221	334	0.66	0.0470	0.0014	0.0569	0.0015	0.0088	0.0002	56	1	56	1
10GW247 20	5.98	350	596	0.59	0.0470	0.0040	0.0536	0.0043	0.0083	0.0002	53	4	53	1
10GW247 21	6.04	373	615	0.61	0.0575	0.0020	0.0656	0.0021	0.0083	0.0002	65	2	53	1
10GW247 22	3.75	258	369	0.70	0.0518	0.0016	0.0601	0.0017	0.0084	0.0002	59	2	54	1
10GW247 23	2.49	196	226	0.87	0.0461	0.0028	0.0548	0.0031	0.0086	0.0002	54	3	55	1
11GW048														
11GW048 01	1.05	81	101	0.80	0.0472	0.0098	0.0575	0.0118	0.0088	0.0002	57	11	57	2
11GW048 02	4.27	321	449	0.71	0.0468	0.0036	0.0537	0.0041	0.0083	0.0001	53	4	54	1
11GW048 03	4.42	537	392	1.37	0.0471	0.0041	0.0567	0.0049	0.0087	0.0002	56	5	56	1
11GW048 04	4.42	309	485	0.64	0.0468	0.0036	0.0520	0.0040	0.0081	0.0001	51	4	52	1
11GW048 05	4.59	325	446	0.73	0.0475	0.0037	0.0576	0.0044	0.0088	0.0001	57	4	56	1
11GW048 06	3.24	231	330	0.70	0.0472	0.0032	0.0560	0.0037	0.0086	0.0001	55	4	55	1
11GW048 07	6.64	837	628	1.33	0.0471	0.0024	0.0516	0.0026	0.0080	0.0001	51	3	51	1
11GW048 08	2.79	282	276	1.02	0.0470	0.0053	0.0535	0.0060	0.0083	0.0002	53	6	53	1
11GW048 09	2.07	74	238	0.31	0.0470	0.0063	0.0546	0.0073	0.0084	0.0002	54	7	54	1
11GW048 10	4.39	328	490	0.67	0.0472	0.0031	0.0512	0.0034	0.0079	0.0001	51	3	51	1
11GW048 11	7.08	596	738	0.81	0.0472	0.0023	0.0527	0.0025	0.0081	0.0001	52	2	52	1
11GW048 12	3.44	253	365	0.69	0.0471	0.0062	0.0526	0.0069	0.0081	0.0002	52	7	52	1
11GW048 13	1.32	94	137	0.69	0.0471	0.0100	0.0538	0.0113	0.0083	0.0003	53	11	53	2
11GW048 14	2.23	112	241	0.46	0.0470	0.0048	0.0552	0.0056	0.0085	0.0002	55	5	55	1
11GW048 15	6.52	695	631	1.10	0.0522	0.0040	0.0576	0.0044	0.0080	0.0001	57	4	51	1
11GW048 16	4.63	396	432	0.92	0.0471	0.0032	0.0567	0.0038	0.0087	0.0002	56	4	56	1
11GW048 17	6.48	643	559	1.15	0.0561	0.0055	0.0674	0.0065	0.0087	0.0002	66	6	56	1
11GW048 18	2.62	113	289	0.39	0.0475	0.0051	0.0565	0.0060	0.0086	0.0002	56	6	55	1
11GW048 19	1.81	100	194	0.51	0.0472	0.0050	0.0551	0.0058	0.0085	0.0002	54	6	54	1
11GW048 20	5.23	388	546	0.71	0.0513	0.0050	0.0567	0.0055	0.0080	0.0001	56	5	52	1
11GW048 21	2.79	156	292	0.54	0.0471	0.0049	0.0567	0.0058	0.0087	0.0002	56	6	56	1
11GW048 22	3.32	213	365	0.58	0.0473	0.0040	0.0530	0.0044	0.0081	0.0002	52	4	52	1
11GW048 23	5.11	445	521	0.85	0.0471	0.0032	0.0532	0.0036	0.0082	0.0001	53	3	53	1
11GW048 24	1.69	120	183	0.65	0.0471	0.0050	0.0526	0.0056	0.0081	0.0002	52	5	52	1
11GW048 25	5.50	328	565	0.58	0.0471	0.0039	0.0560	0.0046	0.0086	0.0001	55	4	55	1

统(UPI93SS)和美国 AGILENT 科技有限公司生产的 Agilent 7500a 型四级杆等离子质谱仪联合构成的激光等离子质谱仪(LA-ICP-MS)。实验采用高纯度 He 作为剥蚀物质的载气,激光器工作频率为 10Hz,测试点的激光束斑直径为 36 μm ,质谱仪有效采集时间为 45s。U-Pb 同位素分馏以国际标准

锆石 91500 作为外部校正,使用锆石中含量最稳定的 ^{29}Si 作为内标,使用 TEM(416 \pm 5Ma) 和 QH(160 \pm 1Ma) 作为监控标样。采用 Glitter 4.4 程序处理数据,普通铅校正详见 Andersen (2002),年龄计算与谐和图的绘制均采用国际标准程序 Isoplot(ver3.0) (Ludwig, 2003)。本文样品锆石的 LA-

表 2 临山花岗岩闪长岩主量元素 (wt%) 和微量元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果Table 2 Major (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) contents of Linshan granodiorites

样品号	10GW246	10GW247	11GW045	11GW046	11GW047	11GW048	11GW049	11GW050	Adakite 1	Adakite 2	Adakite 3	Adakite 4	Adakite 5
SiO ₂	72.42	69.41	68.90	70.02	69.56	70.29	69.01	68.71	63.89	64.66	59.70	62.55	61.36
Al ₂ O ₃	14.08	15.38	15.67	14.97	15.21	15.41	15.61	15.51	17.40	16.77	15.43	17.27	18.36
Fe ₂ O ₃	2.01	2.41	3.02	2.98	2.74	2.53	2.77	2.87	4.68	4.20	3.75	3.48	3.84
MgO	0.92	1.16	1.20	1.17	1.11	0.94	1.21	1.14	2.47	2.20	4.76	3.62	3.50
MnO	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.08	0.08	0.04	0.09	0.07
TiO ₂	0.34	0.42	0.47	0.46	0.43	0.37	0.44	0.42	0.61	0.51	0.89	0.62	0.71
CaO	1.93	2.41	2.76	2.57	2.57	2.69	2.92	3.05	5.23	5.00	7.48	7.12	7.80
K ₂ O	3.47	3.29	3.10	3.04	3.02	2.79	3.13	2.95	1.52	1.72	2.08	1.22	0.57
Na ₂ O	3.29	3.52	4.35	4.09	4.22	4.41	4.10	4.21	4.40	4.09	3.69	4.66	4.42
P ₂ O ₅	0.06	0.07	0.17	0.16	0.15	0.14	0.16	0.15	0.19	0.17	0.39		0.30
LOI	0.99	1.45	0.28	0.47	0.90	0.27	0.57	0.92					
Total	99.57	99.58	99.99	99.99	99.98	99.90	99.98	99.98					
Mg#	47	49	44	44	45	42	46	44	48	51	72	67	64
Sc	4.55	5.02	5.07	4.68	4.48	3.24	4.88	4.70					
V	34.7	40.4	42.6	43.1	39.6	32.5	40.9	44.1					
Cr	9.38	11.7	11.6	11.6	10.2	8.24	10.4	10.8	54	36	161	97	63
Co	4.04	5.34	6.17	6.27	6.12	5.26	6.46	6.49					
Ni	4.79	5.96	8.02	7.50	7.38	6.39	8.39	8.09	39	24	126	76	53
Cu	7.21	5.96	20.4	18.7	16.9	13.9	16.1	13.1					
Zn	39.0	40.5	64.6	62.6	64.2	55.0	54.7	54.7					
Ga	16.3	17.8	14.9	15.2	14.2	12.3	14.6	13.4					
Rb	106	110	94.3	90.2	93.6	69.5	114	108	30		13		3
Sr	331	416	578	565	573	531	511	525	869	706	2366	1886	1910
Y	6.94	6.64	13.30	11.20	9.83	9.65	12.40	11.3	9.5	10			6
Nb	9.83	10.3	12.0	10.2	10.1	10.6	10.0	9.48	8.3				11
Mo	0.17	0.11	36.10	9.61	0.47	0.49	0.37	0.40					
Cd	0.09	0.15	0.20	0.10	0.07	0.02	0.03	0.02					
In	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03					
Sb	0.07	0.15	0.10	0.34	0.04	0.06	0.07	0.08					
Cs	5.92	6.15	4.90	6.30	6.25	3.47	8.60	7.79					
Ba	568	683	857	898	840	787	736	737	485		320	306	124
La	30.9	27.6	40.5	47.4	37.5	27.4	44.1	37.1	17.5	19	30.3	26.6	27.9
Ce	56.9	49.9	74.6	84.4	69.0	48.0	80.9	67.7	34.6		70.9	60.9	63.5
Pr	5.96	5.20	8.18	9.40	7.27	5.73	8.60	7.19					
Nd	20.0	17.1	27.5	32.8	25.8	18.5	30.4	26.1	20.1		39.8	30.3	15
Sm	2.69	2.54	4.26	4.63	3.76	3.12	4.75	3.82	3.10		6.8	4.4	4.6
Eu	0.73	0.89	1.65	1.35	1.33	1.19	1.23	1.25	0.97		1.74	1.16	1.6
Gd	2.12	1.99	4.11	4.22	3.19	3.22	4.05	3.42	2.25				
Tb	0.29	0.29	0.52	0.51	0.39	0.33	0.51	0.49	0.37		0.48	0.34	0.77
Dy	1.51	1.35	2.58	2.15	1.88	1.82	2.17	2.19	1.43				
Ho	0.22	0.22	0.45	0.38	0.32	0.29	0.37	0.40					
Er	0.70	0.67	1.26	1.22	0.91	0.99	1.10	1.06					
Tm	0.10	0.10	0.22	0.17	0.15	0.16	0.20	0.16					
Yb	0.65	0.59	1.33	1.05	0.94	0.84	1.04	0.93	0.91	0.93	0.62	0.72	0.85
Lu	0.10	0.09	0.21	0.14	0.15	0.15	0.16	0.15	0.15		0.07	0.09	0.04
Ta	1.07	0.94	0.96	0.81	0.79	0.89	0.94	0.86					
W	0.29	0.90	745	205	7.54	2.96	2.93	1.54					
Tl	0.62	0.64	0.51	0.42	0.51	0.45	0.61	0.59					
Pb	18.6	14.6	13.9	13.1	15.7	15.6	13.6	13.20					
Th	6.63	7.37	9.22	7.43	6.87	6.49	9.50	8.66	3.50		2.9	4.9	4.1
U	1.49	1.15	1.87	1.46	1.43	1.54	1.67	1.27	1.00		1	1.3	1.3
Zr	51.9	55.7	57.3	26.0	27.2	37.3	44.2	38.6	117				117
Hf	1.78	2.00	1.84	1.05	1.12	1.36	1.68	1.38					
Na ₂ O/K ₂ O	0.95	1.07	1.40	1.35	1.40	1.58	1.31	1.43					
Na ₂ O + K ₂ O	6.76	6.81	7.45	7.13	7.24	7.20	7.23	7.16					
A/CNK	1.11	1.12	1.01	1.02	1.02	1.02	1.01	0.99					
A/NK	1.54	1.64	1.49	1.49	1.49	1.50	1.54	1.53					
δSr	0.67	0.97	0.88	0.75	0.94	1.24	0.71	0.87	2.40		3.2	3.2	3.9
δEu	0.90	1.17	1.19	0.92	1.14	1.14	0.84	1.04	1.10		1.4	1.4	1.8
(La/Yb) _N	34.1	33.6	21.8	32.4	28.7	23.3	30.4	28.7	14.0	15	35	27	24
Y/Yb	10.7	11.3	10.0	10.7	10.5	11.5	11.9	12.2	10.4	10.8			7.06

注:表中 Adakite 数据分别引自 Drummond *et al.*, 1996; Martin, 1999; Yagodinski *et al.*, 1995; Kay *et al.*, 1993; Stern and Kilian, 1996

表3 临山花岗闪长岩全岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Whole rock Sr-Nd isotopic compositions of Linshan granodiorites

样品号	Rb(×10 ⁻⁶)	Sr(×10 ⁻⁶)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	⁸⁷ (Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	Sm(×10 ⁻⁶)	Nd(×10 ⁻⁶)
10GW246	106	331	0.9265	0.707519	0.000013	0.70681	2.69	20
11GW045	94	578	0.4720	0.707108	0.000013	0.70675	4.26	28
11GW048	70	531	0.3787	0.707124	0.000014	0.70683	3.12	19
11GW049	114	511	0.6455	0.707559	0.000016	0.70706	4.75	30

样品号	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	ε _{Nd} (0)	ε _{Nd} (t)	t _{DM1} (Ma)	t _{DM2} (Ma)	f _{Sm/Nd}
10GW246	0.08131	0.512476	0.000008	-3.2	-2.4	776	1054	-0.59
11GW045	0.09365	0.512478	0.000007	-3.1	-2.4	854	1057	-0.52
11GW048	0.10195	0.512484	0.000009	-3.0	-2.4	909	1052	-0.48
11GW049	0.09446	0.512483	0.000006	-3.0	-2.3	853	1050	-0.52

注: Age = 54 Ma; $\epsilon_{Nd}(t) = ((^{143}Nd/^{144}Nd)_s - (^{147}Sm/^{144}Nd)_s \times (e^{\lambda t} - 1)) / (^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR} - (^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR} \times (e^{\lambda t} - 1) - 1) \times 10000$;
 $t_{DM} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{143}Nd/^{144}Nd)_s - 0.51315] / [(^{147}Sm/^{144}Nd)_s - 0.2137] \}$; $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR} = 0.512638$, $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR} = 0.1967$,
 $\lambda = 0.654 \times 10^{-11}/y$

ICP-MS U-Pb 分析结果见表 1。

2.2 全岩主量元素和微量元素

野外采集的样品首先经过显微镜下薄片鉴定,然后选择最新鲜的样品用于地球化学分析。全岩的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。其中主量元素在 PW2404 型荧光光谱仪(XRF)上进行,测试流程参照国家标准 GB/T 14506.14—2010;微量元素分析采用 ELEMENT XR 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)完成,测试流程参照国家标准 GB/T 14506.30—2010。本文全岩主量元素和微量元素的分析结果见表 2。

2.3 全岩 Sr-Nd 同位素

全岩 Sr-Nd 同位素组成分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室的 MC-ICP-MS 完成。详细的实验流程见韦刚健等(2002)。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值分别用 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.1194 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 校正,在本文样品的分析过程中,该仪器测定的 Sr 同位素国际标样 NBS987 的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.710243 ± 14 (2σ),Nd 的同位素标样 Shin Etou 的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值为 0.512124 ± 11(2σ)。本文样品的全岩 Sr-Nd 同位素数据见表 3。

2.4 锆石原位 Hf 同位素

锆石原位 Hf 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所 LA-MC-ICP-MS 实验室完成。实验采用 Neptune 多接受电感耦合等离子体质谱仪测定锆石的 Hf 同位素比值,激光束斑直径为 63 μm,采用哈佛大学国际标准锆石 91500 (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282294 ± 0.000015, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.00031) 对

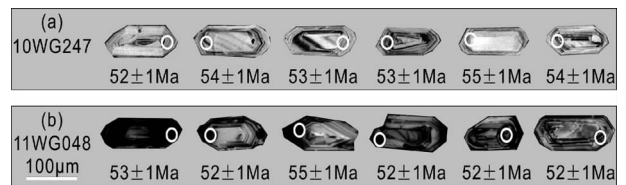


图3 临山花岗闪长岩的代表性锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images of the representative zircons from Linshan granodiorites

仪器状态进行监控,并对样品进行外部校正,详细实验流程及仪器相关参数见 Wu *et al.* (2006)。本文样品的锆石原位 Hf 同位素数据见表 4。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年

本文对佳木斯地块富锦地区临山岩体的 2 个花岗闪长岩样品(10GW247 和 11GW048)进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年。所测锆石多呈自形-半自形晶,阴极发光图像上具明显震荡环带(图 3),Th/U 比值介于 0.31 ~ 1.92 之间,表明它们为岩浆成因锆石(Koschek, 1993; Belousova *et al.*, 2002)。由于所测定的岩石形成于新生代早期,其结果以 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄计算,单点分析年龄误差和加权平均年龄误差均为 1σ。

样品 10GW247 的采样位置为 47°14'07.6"N, 132°14'03.4"E, 23 个锆石分析点均位于 U-Pb 谐和线上, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 52 ~ 56 Ma 之间(表 1),其加权平均年龄为 54 ± 1 Ma (MSWD = 1.5, n = 23) (图 4a)。样品 11GW048 的采样位置为 47°13'43.4"N, 132°15'12.4"E, 25 个锆石分析点均位于 U-Pb 谐和线上, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 51 ~ 57 Ma 之间(表 1),

表 4 始新世花岗岩闪长岩的锆石 Lu-Hf 同位素组成分析结果

Table 4 Lu-Hf isotopic compositions of zircons from the Eocene granodiorites

测点号	Age(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ (corr)	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (corr)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
10GW247											
10GW247 01		0.028548	0.001179	0.282813	0.000015	1.5	2.6	0.5	626	962	-0.96
10GW247 02		0.029016	0.001253	0.282846	0.000015	2.6	3.8	0.5	580	887	-0.96
10GW247 03		0.022397	0.000946	0.282861	0.000015	3.1	4.3	0.5	555	854	-0.97
10GW247 04		0.063711	0.002473	0.282804	0.000017	1.1	2.2	0.6	661	985	-0.93
10GW247 05		0.029242	0.001141	0.282829	0.000015	2.0	3.2	0.5	602	925	-0.97
10GW247 06		0.037092	0.001462	0.282806	0.000017	1.2	2.3	0.6	641	979	-0.96
10GW247 07		0.041068	0.001703	0.282853	0.000016	2.9	4.0	0.6	576	872	-0.95
10GW247 08		0.021928	0.000954	0.282787	0.000015	0.5	1.7	0.5	658	1020	-0.97
10GW247 09		0.033928	0.001449	0.282842	0.000014	2.5	3.6	0.5	588	896	-0.96
10GW247 10		0.074215	0.003022	0.282902	0.000019	4.6	5.7	0.7	525	765	-0.91
10GW247 11		0.045649	0.001924	0.282838	0.000014	2.3	3.4	0.5	603	908	-0.94
10GW247 12	54	0.031711	0.001345	0.282818	0.000014	1.6	2.8	0.5	621	951	-0.96
10GW247 13		0.033494	0.001363	0.282826	0.000014	1.9	3.0	0.5	610	933	-0.96
10GW247 14		0.036728	0.001473	0.282838	0.000016	2.3	3.5	0.6	595	907	-0.96
10GW247 15		0.029547	0.001249	0.282855	0.000014	2.9	4.1	0.5	568	868	-0.96
10GW247 16		0.034260	0.001470	0.282886	0.000015	4.0	5.1	0.5	526	799	-0.96
10GW247 17		0.055898	0.002256	0.282830	0.000016	2.0	3.1	0.6	620	927	-0.93
10GW247 18		0.050838	0.002055	0.282827	0.000015	1.9	3.0	0.5	621	933	-0.94
10GW247 19		0.018015	0.000784	0.282814	0.000014	1.5	2.7	0.5	617	958	-0.98
10GW247 20		0.025489	0.001103	0.282848	0.000016	2.7	3.8	0.6	576	884	-0.97
10GW247 21		0.074208	0.003056	0.282876	0.000019	3.7	4.8	0.7	564	823	-0.91
10GW247 22		0.020537	0.000907	0.282868	0.000016	3.4	4.6	0.6	543	836	-0.97
10GW247 23		0.019970	0.000851	0.282864	0.000017	3.2	4.4	0.6	549	847	-0.97
11GW048											
11GW048 01		0.019376	0.000865	0.282853	0.000024	2.9	4.0	0.9	565	872	-0.97
11GW048 02		0.025848	0.001134	0.282860	0.000019	3.1	4.2	0.7	559	857	-0.97
11GW048 03		0.032542	0.001393	0.282892	0.000023	4.2	5.4	0.8	516	784	-0.96
11GW048 04		0.043099	0.001797	0.282835	0.000018	2.2	3.3	0.6	604	914	-0.95
11GW048 05		0.031882	0.001368	0.282839	0.000019	2.4	3.5	0.7	592	904	-0.96
11GW048 06		0.034915	0.001484	0.282839	0.000018	2.4	3.5	0.7	594	906	-0.96
11GW048 07		0.049315	0.001946	0.282845	0.000024	2.6	3.7	0.8	592	891	-0.94
11GW048 08		0.043858	0.001770	0.282838	0.000020	2.3	3.4	0.7	600	907	-0.95
11GW048 09		0.015978	0.000695	0.282840	0.000018	2.4	3.6	0.6	580	900	-0.98
11GW048 10		0.042231	0.001710	0.282846	0.000023	2.6	3.7	0.8	588	890	-0.95
11GW048 11		0.033466	0.001440	0.282796	0.000017	0.8	1.9	0.6	655	1003	-0.96
11GW048 12		0.032134	0.001351	0.282837	0.000019	2.3	3.4	0.7	594	909	-0.96
11GW048 13	53	0.025491	0.001109	0.282834	0.000022	2.2	3.3	0.8	595	915	-0.97
11GW048 14		0.040199	0.001737	0.282854	0.000021	2.9	4.0	0.7	575	870	-0.95
11GW048 15		0.027930	0.001176	0.282849	0.000016	2.7	3.8	0.6	575	882	-0.96
11GW048 16		0.030696	0.001296	0.282855	0.000018	2.9	4.1	0.6	567	867	-0.96
11GW048 17		0.019234	0.000821	0.282818	0.000017	1.6	2.8	0.6	613	951	-0.98
11GW048 18		0.019581	0.000818	0.282831	0.000017	2.1	3.2	0.6	594	920	-0.98
11GW048 19		0.039818	0.001659	0.282838	0.000021	2.3	3.4	0.7	598	908	-0.95
11GW048 20		0.033896	0.001443	0.282805	0.000017	1.2	2.3	0.6	642	982	-0.96
11GW048 21		0.024852	0.001077	0.282820	0.000017	1.7	2.8	0.6	615	947	-0.97
11GW048 22		0.048182	0.001961	0.282806	0.000019	1.2	2.3	0.7	650	981	-0.94
11GW048 23		0.045486	0.001795	0.282879	0.000022	3.8	4.9	0.8	541	816	-0.95
11GW048 24		0.023033	0.000915	0.282869	0.000027	3.4	4.6	0.9	543	836	-0.97
11GW048 25		0.038467	0.001533	0.282865	0.000022	3.3	4.4	0.8	558	847	-0.95

注:球粒陨石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 现今值分别为0.2828和0.0332(Griffin *et al.*, 2000; Blichert-Toft and Albarède, 1997), λ 为 $1.867 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ (Söderlund *et al.*, 2004); $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, \text{N}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \}$; $t_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \}$

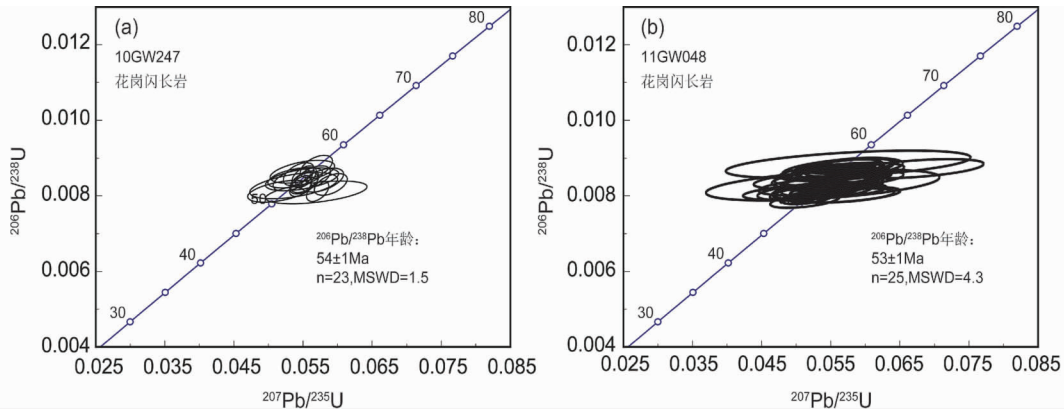
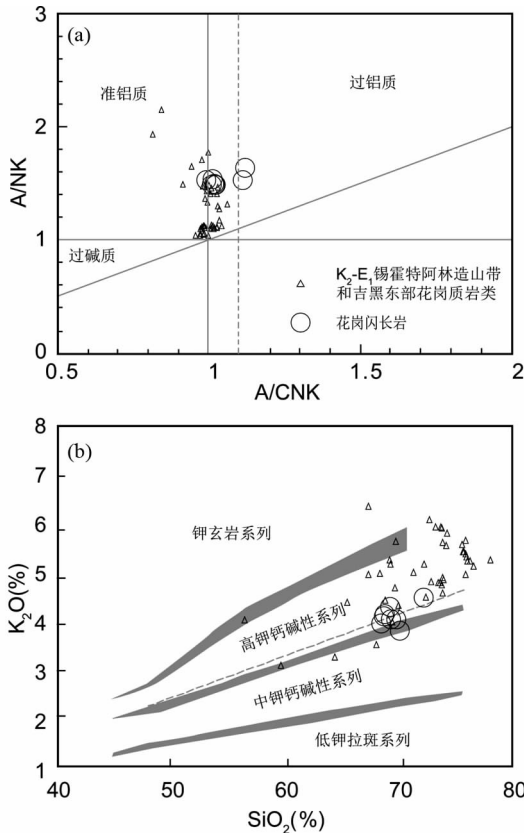


图4 临山花岗闪长岩的锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams of Linshan granodiorites

图5 临山花岗闪长岩的 A/NK-A/CNK 图解 (a, Maniar and Piccoli, 1989) 和 K_2O - SiO_2 图解 (b, Peccerillo and Taylor, 1976)Fig. 5 A/NK vs. A/CNK diagram (a, after Maniar and Piccoli, 1989) and K_2O vs. SiO_2 diagram (b, after Peccerillo and Taylor, 1976) for Linshan granodiorites

其加权平均年龄为 53 ± 1 Ma (MSWD = 4.3, $n = 25$) (图 4b)。上述 2 个样品定年结果在误差范围内一致,代表了临山岩体的形成时代为始新世早期 (~54Ma)。

3.2 地球化学特征

临山岩体花岗质岩石的 $SiO_2 = 68.7\% \sim 72.4\%$, $Na_2O = 3.3\% \sim 4.4\%$, $K_2O = 2.8\% \sim 3.5\%$, $Na_2O/K_2O = 0.95 \sim 1.58$, $Na_2O + K_2O = 6.8\% \sim 7.5\%$, $Al_2O_3 = 14.1\% \sim 15.7\%$, $MgO = 0.92\% \sim 1.2\%$, $Fe_2O_3^T = 2.0\% \sim 3.0\%$, $Mg^{\#} = 42 \sim 49$, $A/CNK = 0.99 \sim 1.12$ 。在 A/NK-A/CNK 变异图解上 (图 5a), 呈现出弱过铝质特征。在 K_2O - SiO_2 图解中 (图 5b), 具有高钾钙碱性系列特征。这些始新世花岗闪长岩的地球化学特征与同时代锡霍特阿林造山带和吉黑东部中酸性火成岩类似 (图 5a, b)。

临山花岗闪长岩显示富含轻稀土元素 (LREEs)、贫重稀土元素 (HREEs)、无明显 Eu 异常 (图 6a) 和明显轻重稀土元素分馏的特征, 它们的 $\Sigma REEs$ 介于 $108 \times 10^{-6} \sim 189 \times 10^{-6}$ 之间, $(La/Yb)_N$ 介于 21.8 ~ 34.1 之间, $\delta Eu = 0.84 \sim 1.19$, $(Gd/Yb)_N = 2.56 \sim 3.32$ 。其稀土配分型式与 Adakite 相比, HREEs 含量偏高 (图 6a)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图 (图 6b) 上, 该区花岗闪长岩总体表现出大离子亲石元素 (Rb, Ba, Th 等) 的富集和高场强元素 (Nb, Ta, Zr, Hf) 及 P 的亏损。

3.3 全岩 Sr-Nd 同位素

本文样品的全岩 Sr-Nd 同位素组成比较均一 (图 7a), $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值分别介于 0.707108 ~ 0.707559 和 0.512476 ~ 0.512484。根据锆石 U-Pb 定年结果 (54Ma) 计算, $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 比值介于 0.7068 ~ 0.7071 之间, $\epsilon_{Nd}(t)$ 介于 -2.4 ~ -2.3 之间, 二阶段 Nd 模式年龄 (t_{DM2}) 介于 1050 ~ 1057Ma 之间。

3.4 锆石 Hf 同位素

从测试结果可以看出, 研究区内两个样品的锆石 Hf 同位素组成基本一致, 它们的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值在 0.282787 至

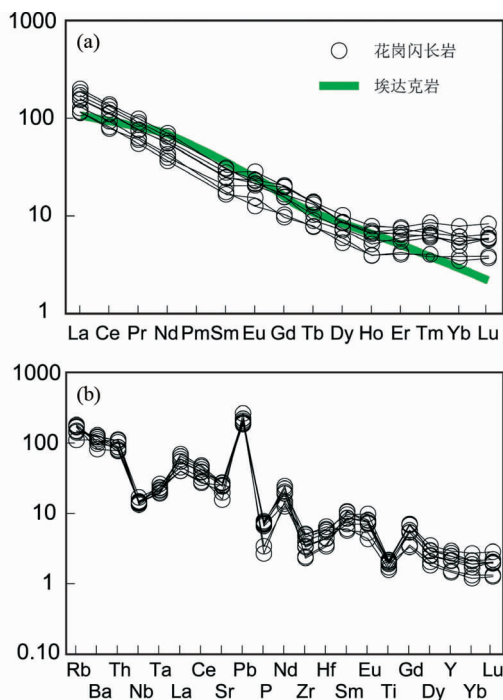


图6 临山花岗闪长岩的球粒陨石标准化稀土配分图解(a)和原始地幔标准化蛛网图(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989; adakite 引自 Yagodzinski *et al.*, 1995)
Fig. 6 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram of Linshan granodiorites (normalization values after Sun and McDonough, 1989; adakite values from Yagodzinski *et al.*, 1995)

0.282902 之间, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 +1.7 ~ +5.7 之间, Hf 同位素单阶段模式年龄 (t_{DM1}) 和二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 分别介于 516 ~ 661 Ma 和 765 ~ 1020 Ma, 这与中亚造山带东段显生宙火成岩中锆石 Hf 同位素组成类似, 而明显不同于华北克拉通显生宙火成岩中锆石 Hf 同位素组成 (图 7b; Yang *et al.*, 2006)。

4 讨论

4.1 始新世花岗闪长岩的发现

Wu *et al.* (2011) 对中国东北地区的花岗质岩石的形成时代做了系统的总结, 初步建立了中生代及以前的年代学框架。研究表明, 该区花岗质岩石主要形成于中生代, 晚古生代和早古生代次之, 另外还有极少量中-新元古代侵入体零星出露。但截至目前, 对于该区是否存在新生代花岗质岩浆作用却没有得到证实。本文研究的富锦地区临山岩体, 黑龙江地质矿产局 (1997) 曾对该区开展过初步的区域地质调查工作, 将临山岩体所在区域一并划分为上石炭统至下二叠统珍子山组范畴。因此, 关于该岩体的形成时代尚没有可靠的

地质关系或同位素年代学资料予以约束。

本文所测定的临山岩体中锆石多呈自形-半自形晶, 锆石 CL 图像 (图 3) 中显示清晰的振荡环带结构, 结合较高的 Th/U 比值 (Th/U = 0.31 ~ 1.92), 表明它们均是岩浆成因锆石, 所测年龄代表了岩体的形成时代。锆石 U-Pb 定年结果显示, 研究区花岗闪长岩的成岩年龄为 ~54 Ma, 表明临山岩体形成时代为始新世。临山岩体的识别和测年结果揭示出, 三江盆地存在新生代早期花岗质岩浆作用, 这也得到了吉林东部延吉地区发育古新世火山作用 (55 ~ 58 Ma 埃达克质安山岩, Guo *et al.*, 2007) 的支持。此外, 在俄罗斯远东地区的东锡霍特阿林也有古近纪花岗岩的报道 (Jahn *et al.*, 2015; Tang *et al.*, 未发表), 它们与本区古近纪花岗岩一起在东北亚大陆边缘构成了一条狭窄的古近纪花岗岩带。

4.2 岩石成因及岩浆源区特征

本文所研究的样品后期蚀变作用甚微, 保持原始的岩浆结晶矿物的特征, 且烧失量值较低 (LOI = 0.27 ~ 1.45) (表 2)。在原始地幔标准化蛛网图上, 碱金属和碱土金属元素未表现出异常 (图 6b)。这些特征表明后期蚀变作用对原始的化学组分影响很小。因此, 全岩主、微量元素和 Sr-Nd-Hf 同位素组成可以用来反演原始岩浆演化过程及源区特征。

4.2.1 岩石成因类型

传统上, 花岗岩可以划分为 M、A、S、I 四种成因类型 (Eby, 1990, 1992; Chappell and White, 2001; Whalen *et al.*, 1987)。临山花岗闪长岩的矿物组成 (普通角闪石和榍石) 和化学属性-高钾钙碱性系列为弱过铝质岩石 (A/CNK 比值介于 0.99 ~ 1.12, 大部分小于 1.1), 可以判定临山花岗闪长岩属于 I 型花岗岩。另外, 样品 Al_2O_3 和 P_2O_5 随着 SiO_2 含量的增加而降低, 进一步验证了其具有 I 型花岗岩的特征 (李献华等, 2007)。Guo *et al.* (2007) 在延吉和龙地区识别出一套具有埃达克质岩石属性的古近纪安山岩, 详细的全岩主、微量、Sr-Nd 同位素和单斜辉石矿物组成分析表明, 该期火山岩是伸展环境下岩浆混合作用的产物, 它的形成并不需要热的、年轻大洋板片的俯冲过程或加厚下地壳的拆沉机制。本文研究的临山花岗闪长岩的年龄为 ~54 Ma, 与上述安山岩时代相当, 那么两者之间地球化学属性是否可以类比, 成因上是否具有相似性呢?

临山花岗闪长岩 $\text{SiO}_2 > 56\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.1\% \sim 15.7\%$, 多数样品大于 15%; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.95 \sim 1.58$, 多数样品大于 1.0; 高 Sr ($331 \times 10^{-6} \sim 578 \times 10^{-6}$, 除一个样品外均大于 400×10^{-6})、低 Y ($6.64 \times 10^{-6} \sim 13.30 \times 10^{-6}$) 和 HREEs, Sr/Y 比值高; 轻重 REE 分异明显 [$(\text{La}/\text{Yb})_N = 21.8 \sim 34.1$]; 在球粒陨石标准化稀土元素配分图和原始地幔标准化微量元素配分图上 (图 6a, b), 无明显 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.84 \sim 1.19$), Sr 呈正异常, HFSEs 相对亏损。

然而, 临山花岗闪长岩与典型埃达克岩相比, Al_2O_3 和 MgO 明显偏低, K_2O 明显偏高 (表 1), HREEs 相对较为平坦

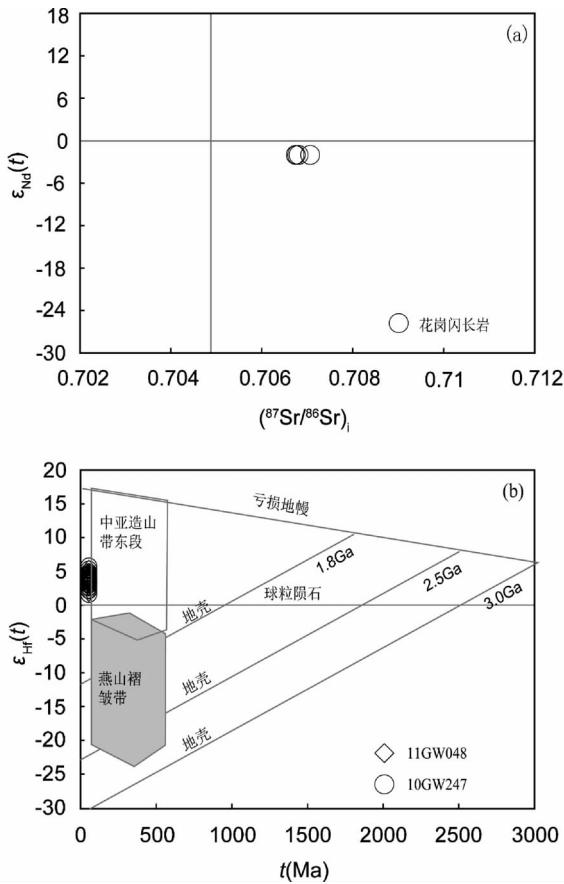


图7 临山花岗闪长岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解(a)和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解(b)

Fig. 7 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram (a) and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. t diagram (b) for Linshan granodiorites

(图6a)。在 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - SiO_2 图上(图8),临山花岗闪长岩呈现出与埃达克岩不同的演化趋势:临山花岗闪长岩的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 随着 SiO_2 的升高而升高,而埃达克岩却呈现与其相反的趋势。上述特征反映临山花岗闪长岩可能与由 Defant and Drummond (1990)提出的由年轻的、热的俯冲洋壳部分熔融形成的典型埃达克岩具有不同的成因机制。

4.2.2 岩浆演化及源区特征

花岗岩的起源主要有以下三种:(1)幔源岩浆的结晶分异(Han *et al.*, 1997);(2)岩浆混合(Jahn *et al.*, 2000);(3)地壳物质的部分熔融(Yang *et al.*, 2015a)。临山花岗闪长岩样品的 Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值相对均一,分别介于 9.2 ~ 12.9(平均值为 11.5)和 24.3 ~ 31.1(平均值为 27.4),与原始地幔组成(原始地幔: Nb/Ta = 17.8, Zr/Hf = 37; McDonough and Sun, 1995)相差甚远,而与地壳组成(Nb/Ta = 11.4, Zr/Hf = 33; Taylor and McLennan, 1985)更为接近。该区花岗闪长岩的 MgO(0.92% ~ 1.2%)、 Fe_2O_3^T (2.0% ~ 3.0%)的含量较低,同时岩石具有较低的过渡元素 Cr(8.24×10^{-6} ~ 11.7×10^{-6})、Co(4.04×10^{-6} ~ 6.49×10^{-6})、Ni(4.79×10^{-6} ~

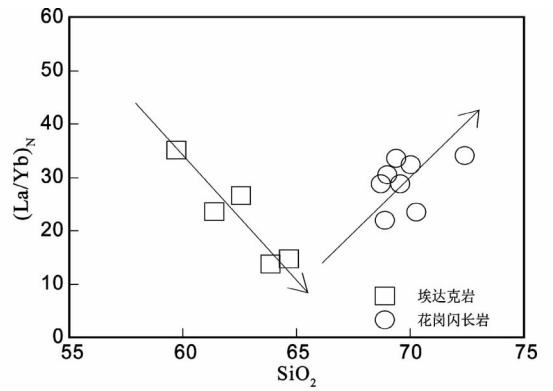


图8 临山花岗闪长岩的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - SiO_2 图解(图中埃达克岩数据引自 Drummond *et al.*, 1996; Martin, 1999; Yogodzinski *et al.*, 1995; Kay *et al.*, 1993; Stern and Kilian, 1996)

Fig. 8 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ vs. SiO_2 diagram for Linshan granodiorites (data of adakites from Drummond *et al.*, 1996; Martin, 1999; Yogodzinski *et al.*, 1995; Kay *et al.*, 1993; Stern and Kilian, 1996)

8.39×10^{-6})的含量,以上表明临山花岗闪长岩不可能来自幔源岩浆。对研究区进行野外考察过程中,并未发现有暗色微粒包体及其他岩浆混合的地质现象,且该区岩石的同位素组成变化范围较小,暗示其岩浆源区成分较均一(图7a, b),故排除岩浆混合成因的可能性。临山花岗闪长岩具有高硅、富铝、富碱、贫镁、贫铁、富集大离子亲石元素,贫高场强元素的特征,表明这些花岗闪长岩应为地壳物质部分熔融的产物(Taylor and McLennan, 1985; Hofmann, 1988; 吴福元等, 2007; 张旗等, 2008)。花岗闪长岩重稀土元素含量较低且分馏较弱暗示岩浆源区具有富含重稀土元素的矿物(如石榴子石±角闪石)的残留,暗示其原始岩浆应起源于加厚陆壳物质的部分熔融。结合临山花岗闪长岩具有I型花岗岩的特征,表明其原始岩浆应来源于由基性火成岩组成的加厚陆壳物质的部分熔融(Roberts and Clemens, 1993)。

岩石同位素组成分析显示,临山花岗闪长岩中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较为均一,变化范围小。在Hf同位素组成演化图解上(图7b),所有测试点均位于球粒陨石和亏损地幔演化线之间,远离古老地壳的Hf同位素演化线。锆石Hf二阶段模式年龄介于765 ~ 1020Ma之间,全岩二阶段Nd模式年龄介于1050 ~ 1057Ma之间。上述同位素特征表明临山花岗闪长岩的源区物质应是中元古代至新元古代时期从亏损地幔中增生的地壳物质。

La/Sm-La判别图解(图9a)显示,该区花岗闪长岩在岩浆演化过程中主要经历了分离结晶作用(Allègre and Minster, 1978)。样品随着 SiO_2 含量的升高, Al_2O_3 、MgO、 Fe_2O_3^T 含量降低(表2),反映岩浆演化过程中普通角闪石发生了分离结晶,这也得到了相对平坦的重稀土元素分配型式

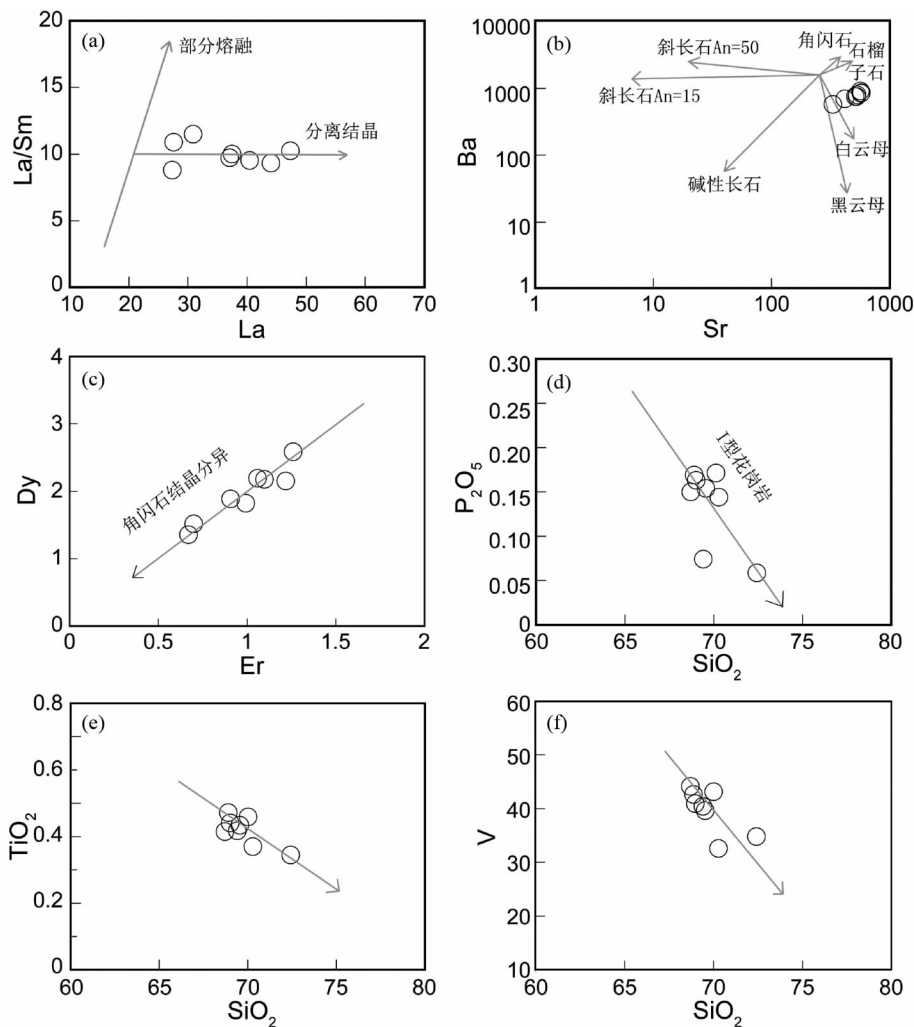


图9 临山花岗闪长岩的主要元素和微量元素协变图解

Fig. 9 Major element and trace element covariant diagrams for Linshan granodiorites

和 Ba-Sr (图 9b) 及 Dy-Er (图 9c) 图解的支持。在稀土元素的配分图 (图 6a) 上, 样品的 Eu 异常不明显, 表明岩浆演化过程中, 斜长石并非主要结晶分离相。由于岩浆中的 P_2O_5 主要富集于副矿物磷灰石中, TiO_2 和 V 主要富集于磁铁矿中。因此, 伴随着岩浆演化的过程, P_2O_5 、 TiO_2 和 V 的变化 (图 9d-f), 表明了岩浆演化过程中磷灰石和磁铁矿结晶分异作用的存在。综上可知, 在临山花岗闪长岩形成之前的原始岩浆演化过程中主要经历了普通角闪石、磷灰石、磁铁矿的结晶分异作用。

综上所述, 富锦地区临山岩体的花岗闪长岩属高钾钙碱性 I 型花岗岩类, 主要起源于年轻火成岩陆壳物质的部分熔融, 岩浆源区为石榴子石 (\pm 角闪石) 稳定区, 在原始岩浆演化过程中主要经历了角闪石、磷灰石、磁铁矿的结晶分异作用。

4.3 三江盆地基底性质

三江盆地自西向东由绥滨拗陷、富锦隆起和前进拗陷组

成, 具有“两拗一隆”地质地貌特征。三江盆地位于佳木斯地块和那丹哈达地体的交汇部位, 目前对其基底性质主要存在以下几种认识: (1) 对应“两拗一隆”地质格局, 三江盆地的基底性质也具有三分性: 即西部绥滨拗陷主要由下元古界变质岩及侵入其中的花岗岩组成 (董林森, 2008; 赵传振, 2010; 关德范, 1980)。中部富锦隆起主要为晚古生代变质岩和同时期侵入的花岗岩基底 (赵传振, 2010; 关德范, 1980; 董林森, 2008; 胡志方等, 2006)。东部前进拗陷主要为早、中侏罗世海相硅质岩系及中生代花岗岩, 属于那丹哈达地体的一部分 (胡志方等, 2006); (2) 三江盆地西部绥滨拗陷和中部富锦隆起的基底组成一致, 同为与佳木斯地块麻山杂岩具有一致岩相学特征的古老基底物质 (刘杰等, 2004)。而东部前进拗陷的基底则为具有那丹哈达地体特征的早、中侏罗世海相硅质岩系及其海底喷发辉绿岩 (关德范, 1980; 赵传振, 2010; 董林森, 2008)。上述关于三江盆地基底组成的认识主要来源于区域地质调查和初步的油气勘探

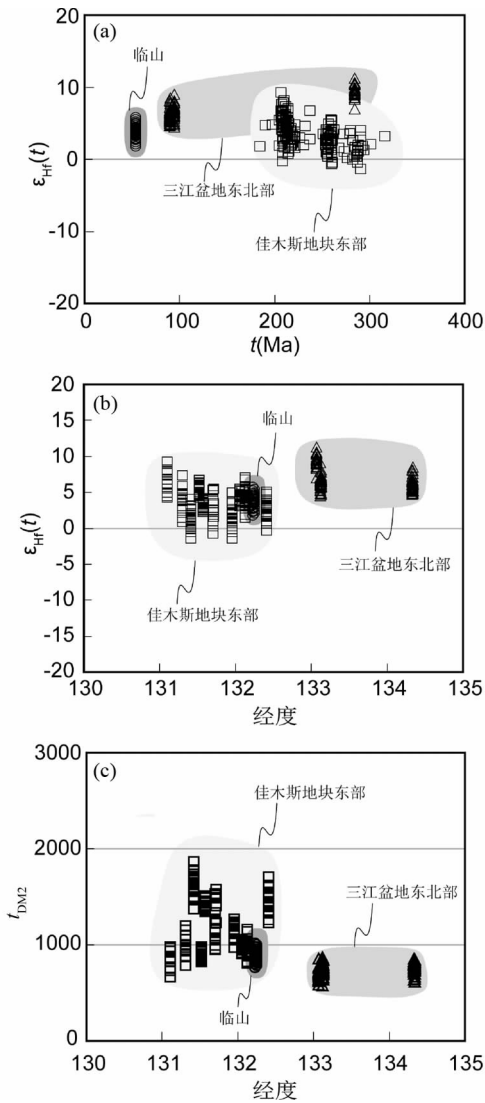


图 10 佳木斯地块东缘和三江盆地东北部代表性岩石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解 (a)、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -经度图解 (b) 和 t_{DM2} -经度图解 (c) (佳木斯地块和三江盆地数据引自 Yang *et al.*, 2015a, b; 毕君辉等, 2014; 于介江等, 2013a, b, c; 柳佳成, 2015)

Fig. 10 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. t (a), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. longitude (b) and t_{DM2} vs. longitude (c) diagrams for representative rocks in the east part of Jiamusi Massif and the northeast part of Sanjiang basin (data of Jiamusi Massif and Sanjiang basin from Yang *et al.*, 2015a, b; Bi *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2013a, b, c; Liu, 2015)

等工作,这就导致了基底对比所在层位可能较浅,很难反映其深部地壳的组成和性质。本文统计了三江盆地东北缘勤得利六连、街津口和抚远地区已发表的早二叠世-晚白垩世花岗质岩石的锆石 Hf 同位素资料,结合临山岩体的同位素数据,与佳木斯地块东部花岗质岩石的锆石 Hf 同位素组成

进行对比,讨论三江盆地基底的深部组成及其与佳木斯地块东部的异同。

统计的锆石 Hf 同位素资料显示,佳木斯东部密山地区二叠纪花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-3.0 \sim +4.8$, t_{DM2} 介于 $976 \sim 2005$ Ma (Yang *et al.*, 2015a, b), 三叠纪花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-0.4 \sim +9.14$, t_{DM2} 介于 $664 \sim 1710$ Ma (Yang *et al.*, 2015a); 佳木斯地块东部二叠纪锦山花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和二阶段模式年龄分别介于 $-4.0 \sim +5.4$ 和 $951 \sim 1578$ Ma (毕君辉等, 2014)。而三江盆地东北缘早二叠世六连岩体的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $+6.93 \sim +11.23$, t_{DM2} 介于 $628 \sim 862$ Ma (于介江等, 2013c); 三江盆地东北缘街津口-抚远地区晚白垩世花岗闪长(斑)岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $+4.73 \sim +8.42$, t_{DM2} 介于 $617 \sim 853$ Ma (于介江等, 2013b; 柳佳成, 2015)。数据对比和作图分析可以看出,三江盆地和佳木斯地块东部花岗质岩石具有相似的锆石 Hf 同位素组成:其一,绝大多数锆石测试点具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,且变化范围基本一致(图 10a, b);其二,绝大多数锆石测试点的二阶段 Hf 模式年龄介于 $610 \sim 1600$ Ma 之间,属于中元古代至新元古代范畴(图 10c)。这就表明佳木斯地块东部与三江盆地基底具有相似的地壳演化历史,其深部基底皆是由中元古代至新元古代时期增生的地壳物质组成。需要注意的是,佳木斯地块东部花岗质岩石出现一些 t_{DM2} 为古元古代、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为负值的锆石测试点。另外,在锆石 Hf 同位素组成对经度的变化图解中,我们发现 t_{DM2} 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在空间位置上存在线性变异特征,自西向东, t_{DM2} 显示由老变新的过渡趋势, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值呈现逐渐增大的趋势。上述差异性特征的存在主要是因为:第一,佳木斯地块的基底物质存在不均一性,越是靠近核心部位(鸡西西麻山附近区域)其古老地壳物质的成分可能就越多;第二,三江盆地识别出来的花岗质岩石较为年轻,地壳同位素组成随时间演化本身具有趋向亏损的趋势。

综上所述我们认为三江盆地基底和佳木斯地块可能具有相同的构造属性,即三江盆地应该是在佳木斯地块之上形成的地质单元。

4.4 对富锦隆起时限的制约

研究区位于三江盆地中部富锦地区(也称富锦隆起),该隆起与其西侧的绥滨拗陷和东侧的前进拗陷共同组成了三江盆地“两拗一隆”的格局。目前,对三江盆地“两拗一隆”格局形成时限研究工作较少,主要存在以下两种认识:(1)富锦隆起在早白垩世早期就是三江盆地东西拗陷的分界(章倩倩, 2012; 张海东等, 2015);(2)早白垩世晚期,东亚大陆边缘发生了一次强烈的碰撞造山事件,导致富锦隆起附近发生大规模抬升(和钟铨等, 2009)。由于缺少高精度的年代学证据支持,使得富锦隆起时限问题未能得到明确限定。

本文所研究的临山花岗闪长岩岩体位于富锦隆起部位,野外地质接触关系表明,临山岩体侵入到上石炭统至下二叠统的珍子山组中(黑龙江省地质矿产局, 1997),该岩体出露

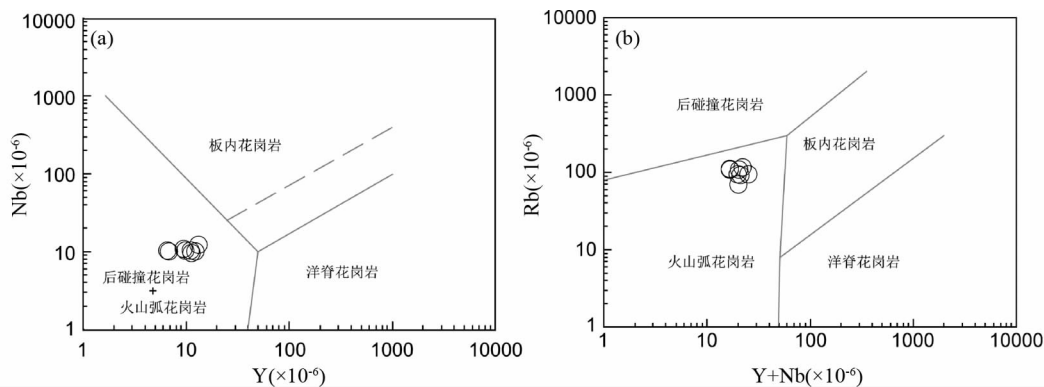


图 11 临山花岗闪长岩的 Nb-Y(a) 和 Rb-(Y + Nb)图解(b) (据 Pearce, 1996)

Fig. 11 Nb vs. Y (a) and Rb vs. (Y + Nb) (b) diagrams for Linshan granodiorites (after Pearce, 1996)

地表系地壳抬升使其上覆岩石地层遭受剥蚀所致。因此,富锦地区发生的地壳抬升隆起时间应该晚于该岩体的形成时代。富锦地区临山花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学结果显示,该岩体的形成时代为始新世 (~54Ma)。由此断定,富锦隆起并非前人认为的中生代隆起(章倩倩, 2012; 张海东等, 2015; 和钟铎等, 2009),而是发生在始新世 (~54Ma)之后的新生代隆起。这就暗示,三江盆地不同位置,尤其是西侧绥滨拗陷和东侧的前进拗陷内始新世之前沉积形成的地层单元是可以横向对比的,这对以后的油气勘探和开发可能具有重要指示意义。

4.5 构造意义

目前对于东北及其邻区古近纪火成岩及其构造背景的研究甚少(Guo *et al.*, 2007; Jahn *et al.*, 2015)。三江盆地临山花岗闪长岩侵位时代的确认对东亚大陆边缘新生代构造演化提供了更有效的约束。本文研究的始新世花岗质岩石为弱过铝质的高钾钙碱性 I 型花岗岩,构造判别图解(图 11)显示,所有样品均落在火山弧环境,暗示其产生可能与大洋板块俯冲过程密切相关。近年来,很多学者在俄罗斯远东锡霍夫阿林南端(92 ~ 56Ma, Tang *et al.*, 未发表)、滨海地区(90 ~ 56Ma, Jahn *et al.*, 2015)、哈巴罗夫斯克地区(131 ~ 75Ma, Jahn *et al.*, 2015)识别出大量 I 型花岗质岩石,它们沿北东向连续分布,与该区广泛存在的同期火山作用(Khanchuk *et al.*, 2016)共同构成了欧亚大陆东缘火成岩带(Jahn *et al.*, 2015),进而揭示晚白垩世至古近纪末期俯冲环境的存在。此外,在该花岗岩带西南侧的延吉地区存在古新世末期至始新世初期与伸展环境有关的埃达克质安山岩(58 ~ 55Ma, Guo *et al.*, 2007),同时代火成岩的空间变异揭示了该时期岩浆作用的动力源应该源于东部,即太平洋板块向欧亚大陆的俯冲作用造成了欧亚大陆东缘白垩纪晚期至古近纪初期岩浆作用的形成。综上所述,三江盆地临山始新世花岗闪长岩形成于太平洋板块向欧亚大陆下俯冲的构造背景。

5 结论

通过对三江盆地富锦地区临山岩体花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学、全岩 Sr-Nd 同位素及锆石 Hf 同位素分析,可以得到以下结论:

(1) 本文首次发现中国东北地区新生代花岗质侵入岩体,其锆石 U-Pb 定年结果显示:其形成于始新世 (~54Ma),由此推断,富锦隆起的时限应为始新世之后。

(2) 临山花岗闪长岩属于弱过铝质、高钾钙碱性 I 型花岗岩。其原始岩浆起源于中元古代末至新元古代增生的加厚陆壳物质的部分熔融。岩浆演化过程中主要经历了普通角闪石、磷灰石、磁铁矿的结晶分异作用。

(3) 三江盆地基底和佳木斯地块可能具有相同的构造属性,其深部基底皆是由中元古代至新元古代时期增生的地壳物质组成。三江盆地临山地区始新世初期花岗闪长岩的形成与太平洋板块向欧亚大陆下俯冲过程密切相关。

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所杨进辉和杨岳衡研究员在锆石 U-Pb-Hf 同位素测试过程中给予的帮助;感谢中国科学院广州地球化学研究所梁细荣研究员在全岩 Sr-Nd 同位素组成分析过程给予的帮助;感谢核工业北京地质研究院分析测试研究中心在全岩主、微量分析过程中给予的支持。

References

- Allègre CJ and Minster JF. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 1-25
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Belousova E, Griffin W, O'Reilly SY and Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602

- 622

- Bi JH, Ge WC, Zhang YL, Yang H and Wang ZH. 2014. Petrogenesis of Permian Jinshan granitic complex in the eastern Jiamusi Massif and its geological implications. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 36(4): 16–31 (in Chinese with English abstract)
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1–2): 243–258
- Bureau of Geology and Mineral Resource of Inner Mongolia Autonomous Region. 1991. *Regional Geology of Inner Mongolia Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House, 1–725 (in Chinese)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province. 1993. *Regional Geology of Heilongjiang Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1–734 (in Chinese)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province (BGMRH). 1997. *Multiple Classification and Correlation of the Stratigraphy of China (23): Stratigraphy (Lithostratic) of Heilongjiang Province*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1–298 (in Chinese)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province. 1988. *Regional Geology of Jilin Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1–698 (in Chinese)
- Chappell BW and White AJR. 2001. Two contrasting granite types; 25 years later. *Australian Journal Earth Sciences*, 48(4): 489–499
- Cheng RY, Wu FY, Ge WC, Sun DY, Liu XM and Yang JH. 2006. Emplacement age of the Raohe complex in eastern Heilongjiang Province and the tectonic evolution of the eastern part of northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 353–376 (in Chinese with English abstract)
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662–665
- Dong LS. 2008. Characteristics of sedimentary and evolution of Sanjiang basin in eastern Heilongjiang Province. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University (in Chinese with English summary)
- Drummond MS, Defant MJ and Kepezhinskis PK. 1996. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas. *Geological Society of America Special Papers*, 315: 205–215
- Eby GN. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26(1–2): 115–134
- Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7): 641–644
- Ge WC, Wu FY, Zhou CY and Zhang JH. 2005. Zircon U-Pb ages and its significance of the Mesozoic granites in the Wulanhaote region, central Da Hinggan Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 749–762 (in Chinese with English abstract)
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, van Achterbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147
- Guan DF. 1980. Discussion of Sanjiang basin from the viewpoint of plate tectonics. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, (2): 42–53 (in Chinese)
- Guo F, Nakamura E, Fan WM, Kobayoshi K and Li CW. 2007. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing; Yanji Area, NE China. *Journal of Petrology*, 48(4): 661–692
- Han BF, Wang SG, Jahn BM, Hong DW, Kagami H and Sun YL. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 138(3–4): 135–159
- He ZH, Liu ZJ, Zhang XD, Chen YC and Dong LS. 2009. Subdivisions of structural layers and tectonic-sedimentary evolution of eastern basins in Heilongjiang in Late Mesozoic. *Global Geology*, 28(1): 20–27 (in Chinese with English abstract)
- Hofmann AW. 1988. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297–314
- Hu ZF, Ma YZ, Qiao GL, Yu MD, Li L and Zhang LX. 2006. Petroleum geologic conditions and exploration prospect of Sanjiang basin. *Henan Petroleum*, 20(1): 1–4 (in Chinese)
- Jahn BM, Wu FY and Hong DW. 2000. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia. *Journal of Earth System Science*, 109(1): 5–20
- Jahn BM, Valui G, Kruk N, Gonevchuk V, Usuki M and Wu JTJ. 2015. Emplacement ages, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic characterization of Mesozoic to Early Cenozoic granitoids of the Sikhote-Alin Orogenic Belt, Russian Far East: Crustal growth and regional tectonic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 872–918
- Kay SM, Ramos VA and Marquez M. 1993. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America. *The Journal of Geology*, 101(6): 703–714
- Khanchuk AI, Kemkin IV and Kruk NN. 2016. The Sikhote-Alin orogenic belt, Russian South East: Terranes and the formation of continental lithosphere based on geological and isotopic data. *Journal of Asian Earth Sciences*, 120: 117–138
- Koschek G. 1993. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon. *Journal of Microscopy*, 171(3): 223–232
- Li XH, Li WX and Li ZX. 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(14): 1873–1885
- Liu J, Zhang MZ, Shen GZ and Mo YX. 2004. The characteristics of the metamorphic rock with cordierite, spinel, sillimanite and andalusite assemblage from outcrops of the Fujin uplift in the Sanjiang basin. Beijing: The Assembly of the Third National Conference on Sedimentology, 93 (in Chinese)
- Liu JC. 2015. Petrogenesis and tectonic significance of Late Cretaceous granitic rocks in the Tongjiang-Fuyuan area, Heilongjiang Province. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University (in Chinese with English summary)
- Ludwig KR. 2003. *User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 1–70
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of American Bulletin*, 101(5): 635–643
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429
- McDonough WF and Sun SS. 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology*, 120(3–4): 223–253
- Meng E, Xu WL, Yang DB, Pei FP, Yu Y and Zhang XZ. 2008. Permian volcanisms in eastern and southeastern margins of the Jiamusi Massif, northeastern China: Zircon U-Pb chronology, geochemistry and its tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 53(8): 1231–1245
- Pearce JA. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19(4): 120–125
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81
- Roberts MP and Clemens JD. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21(9): 825–828
- Şengör AMC, Natal' in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299–307
- She HQ, Li JW, Xiang AP, Guan JD, Yang YC, Zhang DQ, Tan G and Zhang B. 2012. U-Pb ages of the zircons from primary rocks in middle-northern Daxinganling and its implications to geotectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 571–594 (in Chinese with English abstract)
- Söderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The

- ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3-4): 311-324
- Stern CR and Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 263-281
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345
- Tang J, Xu WL, Wang F, Wang W, Xu MJ and Zhang YH. 2013. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic magmatism in the Erguna Massif, NE China: Petrogenesis and implications for the breakup of the Rodinia supercontinent. *Precambrian Research*, 224: 597-611
- Tang J, Xu WL, Wang F, Wang W, Xu MJ and Zhang YH. 2014. Geochronology and geochemistry of Early-Middle Triassic magmatism in the Erguna Massif, NE China: Constraints on the tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean. *Lithos*, 184-187: 1-16
- Tang J, Xu WL, Wang F, Zhao S and Wang W. 2016. 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. *Gondwana Research*, 31: 218-240
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1-312
- Wang F, Xu WL, Meng E, Cao HH and Gao FH. 2012. Early Paleozoic amalgamation of the Songnen-Zhangguangcai Range and Jiamusi massifs in the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt: Geochronological and geochemical evidence from granitoids and rhyolites. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 234-248
- Wang ZH, Ge WC, Yang H, Zhang YL, Bi JH, Tian DX and Xu WL. 2015. Middle Jurassic oceanic island igneous rocks of the Raohe accretionary complex, northeastern China: Petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 120-137
- Wei GJ, Liang XR, Li XH and Liu Y. 2002. Precise measurement of isotopic composition of liquid and solid base using (LP)MC-ICPMS. *Geochimica*, 31(3): 295-299 (in Chinese with English abstract)
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419
- Wu FY, Sun DY and Lin Q. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181-189 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1-2): 105-126
- Wu FY, Yang JH, Lo CH, Wilde SA, Sun DY and Jahn BM. 2007. The Heilongjiang Group: A Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the Western Pacific margin of northeastern China. *Island Arc*, 16(1): 156-172
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Sun DY, Ge WC, Zhang YB, Grant ML, Wilde SA and Jahn BM. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1-30
- Xu WL, Ji WQ, Pei FP, Meng E, Yu Y, Yang DB and Zhang XZ. 2009. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin provinces, NE China: Chronology, geochemistry, and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 392-402
- Xu WL, Pei FP, Wang F, Meng E, Ji WQ, Yang DB and Wang W. 2013. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 167-193
- Yang H, Ge WC, Zhao GC, Yu JJ and Zhang YL. 2015a. Early Permian-Late Triassic granitic magmatism in the Jiamusi-Khanka Massif, eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt and its implications. *Gondwana Research*, 27(4): 1509-1533
- Yang H, Ge WC, Zhao GC, Dong Y, Xu WL, Ji Z and Yu JJ. 2015b. Late Triassic intrusive complex in the Jidong region, Jiamusi-Khanka Block, NE China: Geochemistry, zircon U-Pb ages, Lu-Hf isotopes, and implications for magma mingling and mixing. *Lithos*, 224-225: 143-159
- Yang JH, Wu FY, Shao JA, Wilde SA, Xie LW and Liu XM. 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan fold and thrust belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3-4): 336-352
- Yogodzinski GM, Kay RW, Volynets ON, Koloskov AV and Kay SM. 1995. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge. *Geological Society of America Bulletin*, 107(5): 505-519
- Yu JJ, Wang F, Xu WL, Gao FH and Pei FP. 2012. Early Jurassic mafic magmatism in the Lesser Xing'an-Zhangguangcai Range, NE China, and its tectonic implications: Constraints from zircon U-Pb chronology and geochemistry. *Lithos*, 142-143: 256-266
- Yu JJ, Zhang YL, Ge WC and Yang H. 2013a. Geochronology and geochemistry of the Late Cretaceous granitoids in the northern margin of the Sanjiang basin, NE China and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 369-385 (in Chinese with English abstract)
- Yu JJ, Liu JC, Zhang JH, Ge WC and Hou XG. 2013b. Zircon U-Pb dating of the granodiorite-porphyrries in Jiejinkou-Fuyuan area, northeastern Heilongjiang province and its geological significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(5): 1489-1500 (in Chinese with English abstract)
- Yu JJ, Hou XG, Ge WC, Zhang YL and Liu JC. 2013c. Magma mixing genesis of the Early Permian Liulian pluton at the northeastern margin of the Jiamusi massif in NE China: Evidences from petrography, geochronology and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 2971-2986 (in Chinese with English abstract)
- Yu Q, Ge WC, Yang H, Zhao GC, Zhang YL and Su L. 2014. Petrogenesis of Late Paleozoic volcanic rocks from the Daheshen Formation in central Jilin Province, NE China, and its tectonic implications: Constraints from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes. *Lithos*, 192-195: 116-131
- Zhang FQ, Yang SF, Chen HL, A MN, Sun MD and Meng QA. 2012. Tectonic characteristics, evolution and tectonic significance of the Mesozoic-Cenozoic in the Sanjiang basin, Eastern Heilongjiang. Lanzhou: 2012's National Petrological and Geochemical Conference (in Chinese)
- Zhang HD, Guo W, Wang SH and Lin B. 2015. Paleoenvironment reconstruction of Zhenzishan Formation in Fujin uplift of Sanjiang Basin and its petroleum geological significance. *Global Geology*, 34(2): 454-459 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Pan GQ, Li CD and Jin WJ. 2008. Sources of granites: Some crucial questions on granite study (4). *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1193-1204 (in Chinese with English abstract)
- Zhang QQ. 2012. The structural characteristics and depositional filling in the Sanjiang basin. Master Degree Thesis. Jingzhou: Yangtze University (in Chinese with English summary)
- Zhao CZ. 2010. Comprehensive study on petroleum geological conditions of Sanjiang - Middle Amur basin. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University (in Chinese with English summary)
- Zhao S, Xu WL, Wang W, Tang J and Zhang YH. 2014. Geochronology and geochemistry of Middle-Late Ordovician granites and gabbros in the Erguna region, NE China: Implications for the tectonic evolution of the Erguna Massif. *Journal of Earth Science*, 25(5): 841-853
- Zhao X, Yu XH, Yi RL, Qiao GL, Jiang H and Fu J. 2007. Analysis on the structural evolution of Sanjiang basin. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 33(5): 310-313 (in Chinese with English

abstract)

Zhou JB, Zhang XZ, Ma ZH, Liu L, Jin W, Zhang MS, Wang CW and Chi XG. 2009. Tectonic frame work and basin evolution in Northeast China. *Oil & Gas Geology*, 30(5): 530 – 538 (in Chinese with English abstract)

Zhou JB, Cao JL, Wilde SA, Zhao GC, Zhang JJ and Wang B. 2014. Paleo-Pacific subduction-accretion: Evidence from Geochemical and U-Pb zircon dating of the Nanhada accretionary complex, NE China. *Tectonics*, 33(12): 2444 – 2466

附中文参考文献

毕君辉, 葛文春, 张彦龙, 杨浩, 王智慧. 2014. 佳木斯地块东部二叠纪锦山花岗杂岩体的成因及其地质意义. *地球科学与环境学报*, 36(4): 16 – 31

程瑞玉, 吴福元, 葛文春, 孙德有, 柳小明, 杨进辉. 2006. 黑龙江省东部饶河杂岩的就位时代与东北东部中生代构造演化. *岩石学报*, 22(2): 353 – 376

董林森. 2008. 黑龙江省东部三江盆地的沉积特征及演化. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学

葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 2005. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *岩石学报*, 21(3): 749 – 762

关德范. 1980. 从板块构造观点看三江盆地. *大庆石油学院学报*, (2): 42 – 53

和钟铎, 刘招君, 张晓冬, 陈永成, 董林森. 2009. 黑龙江东部晚中生代盆地群构造层划分及构造沉积演化. *世界地质*, 28(1): 20 – 27

黑龙江省地质矿产局. 1993. 黑龙江省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 – 734

黑龙江省地质矿产局. 1997. 全国地层多重划分对比研究(23): 黑龙江省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 1 – 298

胡志方, 马义忠, 乔桂林, 于明德, 李磊, 张留欣. 2006. 三江盆地石油地质条件与勘探前景. *河南石油*, 20(1): 1 – 4

吉林省地质矿产局. 1988. 吉林省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 – 698

李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. *科学通报*, 52(9): 981 – 991

刘杰, 张民志, 沈光政, 莫雨洵. 2004. 三江盆地富锦隆起区露头含堇青石、尖晶石、硅线石和红柱石组合的变质岩特征. 北京: 第三届全国沉积学大会论文摘要汇编, 93

柳佳成. 2015. 黑龙江省同江-抚远地区晚白垩世花岗岩成因及

构造意义. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学

内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 – 725

余宏全, 李进文, 向安平, 关继东, 杨郦城, 张德全, 谭刚, 张斌. 2012. 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. *岩石学报*, 28(2): 571 – 594

韦刚健, 梁细荣, 李献华, 刘颖. 2002. (LP)MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成. *地球化学*, 31(3): 295 – 299

吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. *岩石学报*, 15(2): 181 – 189

吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23(6): 1217 – 1238

于介江, 张彦龙, 葛文春, 杨浩. 2013a. 三江盆地北缘晚白垩世花岗岩锆石的年代学, *地球化学及其构造意义*. *岩石学报*, 29(2): 369 – 385

于介江, 柳佳成, 张嘉惠, 葛文春, 侯雪刚. 2013b. 黑龙江省东北部街津口-抚远地区花岗闪长斑岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 43(5): 1489 – 1500

于介江, 侯雪刚, 葛文春, 张彦龙, 柳佳成. 2013c. 佳木斯地块东北缘早二叠世六连岩体的岩浆混合成因: 岩相学、年代学和地球化学证据. *岩石学报*, 29(9): 2971 – 2986

章凤奇, 杨树锋, 陈汉林, 阿敏娜, 孙明道, 蒙启安. 2012. 黑龙江东部三江盆地中-新生代构造特征、演化及其大地构造意义. 兰州: 2012 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文集

张海东, 郭巍, 王少华, 林斌. 2015. 三江盆地富锦隆起珍子山组古环境恢复及其油气地质意义. *世界地质*, 34(2): 454 – 459

张旗, 王焰, 潘国强, 李承东, 金惟俊. 2008. 花岗岩源岩问题——关于花岗岩研究的思考之四. *岩石学报*, 24(6): 1193 – 1204

章倩倩. 2012. 三江盆地演化与沉积充填特征. 硕士学位论文. 荆州: 长江大学

赵传振. 2010. 三江-中阿穆尔盆地石油地质条件综合研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学

赵霞, 于兴河, 易荣龙, 乔桂林, 姜辉, 付菊. 2007. 三江盆地构造演化分析. *内蒙古石油化工*, 33(5): 310 – 313

周建波, 张兴洲, 马志红, 刘立, 金巍, 张梅生, 王成文, 迟效国. 2009. 中国东北地区的构造格局与盆地演化. *石油与天然气地质*, 30(5): 530 – 538