

doi:10.3799/dqkx.2015.004

# 吉林延边地区棉田岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素

刘金龙<sup>1</sup>, 孙丰月<sup>1\*</sup>, 林博磊<sup>2</sup>, 王英德<sup>1</sup>, 王 硕<sup>1</sup>, 胡安新<sup>1</sup>

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 国土资源部信息中心, 北京 100812

**摘要:** 对延边地区棉田花岗闪长岩岩体进行了锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学以及 Hf 同位素的研究, 以便对其岩石成因和古太平洋板块俯冲作用的开始时间给予制约。棉田岩体主要由花岗闪长岩和次要的花岗岩组成, 花岗闪长岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果表明, 该岩体形成于早侏罗世( $177 \pm 2$  Ma, MSWD=1.13)。在地球化学研究方面, 它们属于高钾钙碱性—钙碱性系列, A/CNK 值介于 0.88~1.12 之间, 属准铝质, 为 I 型花岗岩, 并且明显富集大离子亲石元素(如 K、Ba、Rb)、轻稀土元素(LREE)以及 Th、U, 相对亏损高场强元素(如 Ta、Nb、Ti、P)。岩石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值和二阶段模式年龄( $T_{\text{DM2}}$ )分别介于  $\pm 8.72 \sim \pm 12.28$  和 437~663 Ma 之间。结果表明, 岩体的原始岩浆源于新生代陆壳的部分熔融。综合区域同时代火成岩的研究成果, 认为棉田花岗闪长岩岩体形成于古太平洋板块向欧亚大陆俯冲下的火山弧环境。

**关键词:** 锆石 U-Pb 年龄; 锆石 Hf 同位素; 地球化学; 延边。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2015)01-0049-12

收稿日期: 2014-03-10

## Geochronology, Geochemistry and Zircon Hf Isotope of Miantian Granodiorite Intrusion in Yanbian Region, Southern Jinlin Province and Its Geological Significance

Liu Jinlong<sup>1</sup>, Sun Fengyue<sup>1\*</sup>, Lin Bolei<sup>2</sup>, Wang Yingde<sup>1</sup>, Wang Shuo<sup>1</sup>, Hu Anxin<sup>1</sup>

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

2. Information Center of Ministry of Land and Resources of People's Republic of China, Beijing 100812, China

**Abstract:** This paper presents LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemical and Hf isotopic data of the granodiorite from Miantian intrusion in Yanbian region, with the aim of constraining its petrogenesis and beginning time of subduction of the Paleopacific plate beneath the Eurasian continent. The Miantian intrusion consists mainly of granodiorite with minor diorite. The LA-ICP-MS U-Pb dating results of zircons from the granodiorite indicate that the intrusion formed in the Early Jurassic ( $177 \pm 2$  Ma, MSWD=1.13). Geochemically, these rocks fall into the calc-alkaline to high-K calc-alkaline series, with A/CNK ratios of 0.88–1.12, which are sub-aluminous granites, being of the characteristics of I type granitoids, enrichment in LILE (such as K, Ba, Rb), LREE, Th and U, relatively depleted in HFSE (such as Ta, Nb, Ti, P). The  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of the granodiorite vary from  $\pm 8.72$  to  $\pm 12.28$ , and two-stage model ages ( $T_{\text{DM2}}$ ) vary from 437 to 663 Ma. These characteristics suggest that the primary magma was derived from the remelting of juvenile crustal materials (Neoproterozoic to Early Paleozoic). It is concluded that granodiorite from Miantian intrusion formed in compressional structure setting similar to volcanic arc which could be related to the subduction of the Paleo-Pacific plate beneath the Eurasian continent.

**Key words:** zircon U-Pb chronology; zircon Hf isotope; geochemistry; Yanbian.

**基金项目:** 吉黑东部区域成矿规律综合研究(No.1212011085485); 国家自然科学基金项目(No.41272093)资助。

**作者简介:** 刘金龙(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事矿床学研究, E-mail: liujinlong0815@yeah.net

\* **通讯作者:** 孙丰月, E-mail: sfy@jlu.edu.cn

**引用格式:** 刘金龙, 孙丰月, 林博磊, 等, 2015. 吉林延边地区棉田岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素. 地球科学——中国地质大学学报, 40(1): 49–60.

## 0 引言

研究区位于欧亚大陆东缘,张广才岭南部,为华北地台以北,佳木斯-兴凯地块以西的区域(图 1a)(张艳斌,2002).目前,对东北地区中生代区域成矿背景的认识,多数强调环太平洋构造体系的影响(Ge *et al.*,2007).然而,就该区基础科学问题——环太平洋构造体系开始的时间还有争论(赵越等,1994;赵春荆等,1996;孙德有等,2005a;Wu *et al.*,2007a;裴福萍等,2008;Zhou *et al.*,2009),主要有两种观点:一种认为是晚三叠世(彭玉鲸和陈跃军,2007),而另一种认为是早-中侏罗世(Xu *et al.*,2009;Wu *et al.*,2011).延边分布着大面积的显生宙花岗岩,据 1:20 万资料初步统计,该区显生宙花岗岩的分布面积达 19 000 km<sup>2</sup>,是中国东北花岗岩的重要组成部分(吉林省地质矿产局,1988;吴福元等,1999).由于该区位于古亚洲洋构造域和环太平洋中生代构造域的交汇处,因此花岗岩的研究对阐明两

大构造域的时间转换和地球动力学过程具有十分重要的意义(张艳斌,2002).区内分布面积最大的棉田岩体曾经被认为是延边地区典型的早海西期花岗岩体,依据锆石年龄测定得到不一致年龄的上交点年龄为 310.4 ± 79.1 / - 46.7 Ma(潘丽敏,1991;方文昌,1992).张艳斌(2002)选择高精度颗粒锆石 U-Pb 定年方法获得岩石侵位年龄 189 ± 1 Ma,然而只给出了年代学结果,没有详细的岩石地球化学分析,其成因缺乏直接证据.鉴于此,本文对延边棉田岩体进行了详细的年代学、地球化学及 Hf 同位素研究,旨在揭示其形成时代及构造背景,以及对古太平洋板块俯冲作用的开始时间给予制约.

## 1 地质背景及样品描述

### 1.1 地质背景

研究区位于欧亚大陆东缘,处于佳木斯、兴凯、龙岗三地块及其间的活动带上(赵全国等,2005),是

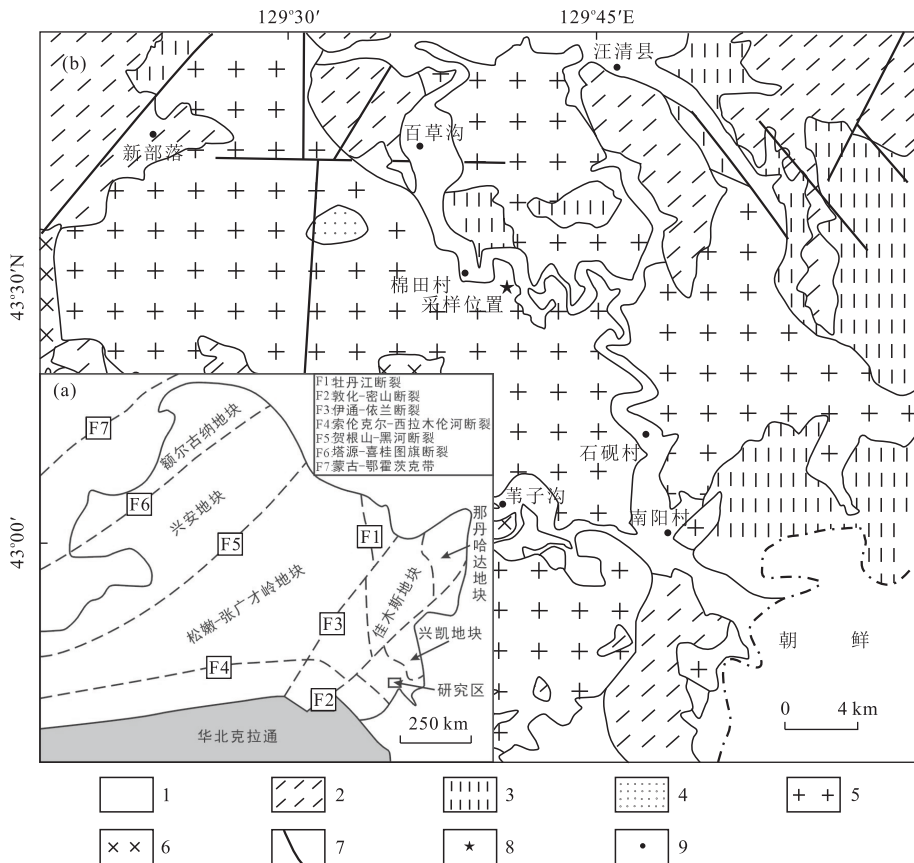


图 1 研究区地质略图

Fig.1 Geological sketch map of the studied area

1. 新生代地层及火山岩; 2. 中生代地层; 3. 三叠系; 4. 仲平岩体; 5. 棉田岩体; 6. 其他花岗岩; 7. 断层; 8. 采样位置; 9. 地名; a 图据 Wu *et al.*, 2011; b 图据逢伟, 2009; Zhang *et al.*, 2004

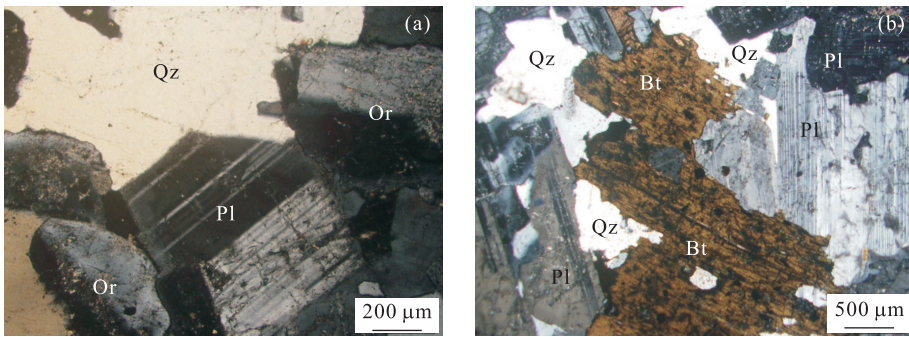


图 2 花岗闪长岩显微照片

Fig.2 Microphotographs of the granite rocks in Miantian

a.花岗闪长岩(-); b.花岗闪长岩(+); Bt.黑云母; Or.正长石; Pl.斜长石; Qz.石英

一个经历了古亚洲洋演化、中生代古太平洋板块向欧亚板块俯冲的大陆边缘复合区(赵宏光,2007)(图 1a)。

区内出露地层包括二叠系至新生界;二叠系主要分布于研究区东部,为浅变质的海相沉积碎屑岩、火山碎屑岩和火山岩等;中生界主要由上三叠统、侏罗系陆相火山岩和白垩系等组成,碎屑岩主要见于白垩系中的长财组石英砂岩、粗砂岩和细砂岩,大砬子组粗砂岩、粉砂岩等;新生界主要有第三纪零星分布的船山底组橄榄玄武岩及玄武质安山岩,第四系地层主要为冲积物、粘土等(吉林省地质矿产局,1988;孟庆丽等,2001)(图 1b)。

研究区构造以断裂为主,依走向主要分为北西—北北西、南北、东西及北东—北东东向等 4 组断裂(孟庆丽等,2001;逢伟,2009)。

棉田岩体分布于汪清县百草沟、延吉市苇子沟以北,为规模较大的呈东西向展布的复式岩体,出露面积约 1 300 km<sup>2</sup>(张艳斌,2002)。岩体的主要岩性为花岗闪长岩,局部为闪长岩、石英二长岩、二长花岗岩和黑云斜长花岗岩(潘丽敏,1991;方文昌,1992),其中的花岗闪长岩显示明显的片麻状构造,详细的野外工作和室内岩相学研究发现,这种片麻状构造表现出不均一性,主要在岩体的边缘处发育,而在岩体的中间部位显示典型的块状构造。岩体的边缘处含有较多大小不等、形态多样的暗色细粒闪长质包体,包体最大达 55 cm<sup>2</sup> × 15 cm<sup>2</sup>,小的有 2 cm<sup>2</sup> × 1 cm<sup>2</sup>。仲坪岩体分布于大面积的棉田花岗闪长岩之中,岩体呈椭圆形,面积约 10 km<sup>2</sup>,由紫苏辉石闪长岩组成,侵位年龄为 129 ± 2 Ma(张艳斌,2002)。

## 1.2 样品描述

棉田花岗闪长岩呈灰白色,半自形粒状结构,块状构造。主要矿物有:石英 1~2 mm,半自形,含量

±20%;斜长石 2~3 mm,个别达到 5 mm,半自形—自形,板状,可见聚片双晶及中长石环带结构,含量±60%,局部发生绢云母化。碱性长石小于 1 mm,含量±10%,可见正长石卡式双晶和微斜长石格子双晶,局部发育高岭土化(图 2a)。黑云母为中细粒,半自形,含量±5%,沿着节理发育了一定的绿泥石化(图 2b)。普通角闪石 1~2 mm,半自形,含量 2%~3%,部分颗粒局部退变为黑云母并析出铁质,部分发生弱绿泥石化。副矿物主要为锆石、榍石、磷灰石、磁铁矿等。

## 2 分析方法

### 2.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学

锆石挑选由河北省廊坊区域地质调查研究所实验室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,通过反射光和透射光照相后,利用 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。锆石制靶、反射光、阴极发光以及锆石 U-Pb 年龄测定和痕量元素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行。本次测试采用的激光剥蚀束斑直径为 32 μm,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm;实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气,锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标,元素含量采用 NIST SRM610 作为外标,<sup>29</sup>Si 作为内标元素(锆石中 SiO<sub>2</sub> 的质量分数为 32.8%(袁洪林等,2003)),分析方法见文献 Yuan *et al.*(2004);普通铅校正采用 Anderson 推荐的方法(Anderson,2002);样品的同位素比值及元素含量计算采用 ICP-MS-DATECAL 程序(Liu *et al.*,

2008; Liu *et al.*, 2010), 年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot 程序(Ludwig, 2003).

## 2.2 岩石地球化学测试

本次实验主量及微量元素的分析测试在澳实分析检测(广州)有限公司完成. 主量元素由荷兰 PANalytical 生产的 Axios 仪器利用熔片 X-射线荧光光谱法(XRF)测定, 并采用等离子光谱和化学法测定进行相互检测. 微量元素和稀土元素采用美国 Perkin Elmer 公司生产的 Elan9000 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定. 主量元素分析精度和准确度优于 5%, 微量稀土元素分析精度和准确度优于 10%.

## 2.3 锆石 Hf 同位素测试

锆石 Lu-Hf 同位素测定在天津地质矿产研究所同位素实验的 LA-MC-ICP-MS 仪器上完成, 实验中所使用的多接收器电感耦合等离子体质谱仪为美国 Thermo Fisher 公司生产的 NEPTUNE, 分析方法的详细流程参见文献耿建珍等(2011). 采用  $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$  (Patchett and Tatsumoto, 1980),  $^{173}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 1.35274$  (Chu *et al.*, 2002), 对 Hf、Yb 同位素比值进行指数归一化质量歧视校正.  $^{176}\text{Hf}$  同质异位素干扰校正及公式参见文献 Chu *et al.* (2002),  $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5887$  (Wu *et al.*, 2006),  $^{175}\text{Lu}/^{176}\text{Lu} = 0.02655$  (Chu *et al.*, 2002).  $^{176}\text{Lu}$  的衰变常数采用  $1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$  (Scherer *et al.*, 2001),  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  的计算利用 Blichert and Albarède(1997)推荐的球粒陨石 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.282772 及  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.0332). Hf 模式年龄计算用的都是当前亏损地幔的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值(0.28325) (Nowell *et al.*, 1998) 和  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值(0.015) (Griffin *et al.*, 2002).

## 3 分析结果

### 3.1 锆石 LA-ICP-MS 年代学

岩石样品中锆石主要为长柱状, 自形程度较好, 锆石具有较为清晰的韵律环带结构, 具有岩浆锆石的特征(图 3). 它们的 U 含量为  $268 \times 10^{-6} \sim 669 \times 10^{-6}$ , Th 含量为  $137 \times 10^{-6} \sim 450 \times 10^{-6}$ . Th/U 比值为 0.41~0.72 之间, 符合岩浆锆石 Th/U 的比值  $>0.4$  的特征(Weaver, 1991). 锆石点位数据均落在谐和线上及其附近, 本文计算其中 13 个年龄谐和的数据得出:  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  数据的加权平均年龄为  $177 \pm 2 \text{ Ma}$ , MSWD=1.13(图 4). 早期锆石定年得到不一致年龄的上交点年龄为  $310.4 + 79.1 / -46.7 \text{ Ma}$  (潘

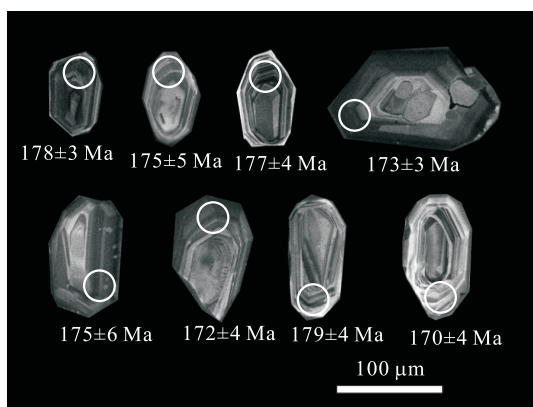


图 3 花岗闪长岩锆石 CL 图像

Fig. 3 CL images of zircons from the granodiorite

丽敏, 1991; 方文昌, 1992), 结果显示 3 组数据表面年龄均不谐和, 而且  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄比较接近, 所以数据点紧密排列在一起, 不能很好地控制不一致线的斜率, 导致获得的上交点年龄具有很大的误差, 达 120 Ma. 张艳斌(2002)选择颗粒锆石 U-Pb 定年方法对 3 组锆石进行测试, 获得岩石侵位年龄  $189 \pm 1 \text{ Ma}$ , 相对于本次试验 13 个数据点误差较大(表 1). 因此, 177 Ma 代表花岗闪长岩的侵位年龄(属早侏罗世).

### 3.2 地球化学特征

**3.2.1 主量元素** 花岗闪长岩分析结果及特征值见表 2, 其中  $\text{SiO}_2$  含量为 62.19%~64.08%;  $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{K}_2\text{O}$  含量分别介于 3.70%~4.00% 和 2.26%~2.87% 之间; 全碱含量介于 6.14%~6.57% 之间;  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.29 \sim 1.72$ ; 铝饱和指数  $A/\text{CNK} = 0.88 \sim 1.12$ .

岩石样品在 TAS 图解中落入亚碱性范围内, 为花岗岩闪长岩(图 5a); 在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解中岩石位于高钾钙碱性系列和钙碱性系列过渡区域(图 5b); 在  $A/\text{CNK}$ - $A/\text{NK}$  图解中, 大部分样品为准铝质, 只有一个落在过铝质范围(图略).

**3.2.2 微量元素** 岩石稀土总量  $\Sigma\text{REE} = 82.12 \times 10^{-6} \sim 105.55 \times 10^{-6}$ , 平均为  $93.39 \times 10^{-6}$ , 在稀土配分模式图上曲线近一致(图 6a). 配分曲线显示出明显右倾,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  为 7.84~10.02, LREE 强烈富集, HREE 极度亏损, 轻重稀土元素分馏明显.  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  值为 0.76~1.00, 具有弱负异常.

花岗闪长岩原始地幔标准化微量元素蛛网图显示(图 6b), 微量元素的配分模式近似一致. 相对于原始地幔, 微量元素表现出了富集大离子亲石元素(如 K、Ba、Rb)和活泼的不相容元素(如 Th、U)的特征, 相对亏损高场强元素(如 Nb、Ta、P、Ti).

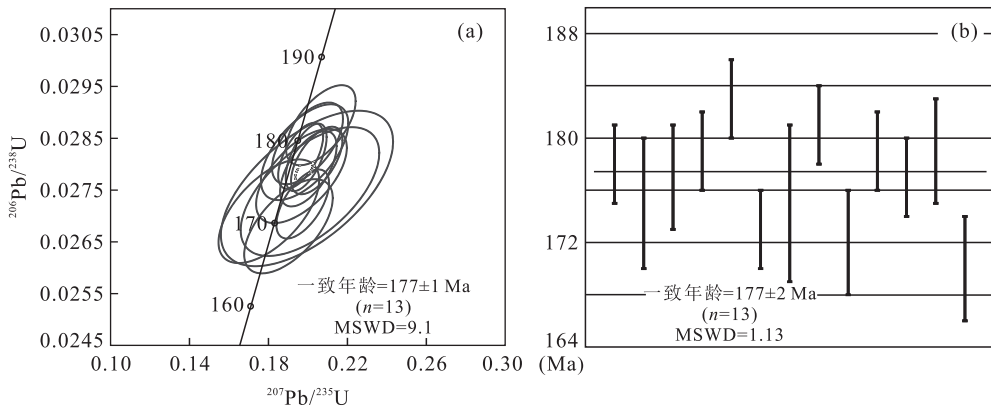


图 4 花岗闪长岩的 U-Pb 年龄谐和图(a)和加权平均年龄(b)

Fig.4 Zircon U-Pb Concordia diagram (a) and weighted average ages diagram (b) from the granodiorite

表 1 花岗闪长岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analyses of the granodiorite rocks

样品	Th( $10^{-3}$ )	U( $10^{-3}$ )	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	$t$ (Ma)	$1\sigma$
NZ-N7-1	218	529	0.412 02	0.052 85	0.002 72	0.204 51	0.008 60	0.028 07	0.000 43	178	3
NZ-N7-2	279	390	0.715 44	0.053 10	0.006 43	0.201 07	0.023 18	0.027 47	0.000 82	175	5
NZ-N7-3	450	642	0.701 93	0.051 40	0.004 30	0.196 77	0.015 18	0.027 77	0.000 60	177	4
NZ-N7-4	307	498	0.616 80	0.050 57	0.002 43	0.196 36	0.007 52	0.028 16	0.000 42	179	3
NZ-N7-5	171	360	0.475 65	0.052 12	0.003 33	0.206 61	0.011 63	0.028 75	0.000 51	183	3
NZ-N7-6	278	398	0.700 28	0.052 57	0.002 81	0.197 40	0.008 81	0.027 23	0.000 44	173	3
NZ-N7-7	381	624	0.610 49	0.052 57	0.007 89	0.199 56	0.028 81	0.027 53	0.000 99	175	6
NZ-N7-8	145	268	0.540 43	0.051 02	0.003 40	0.199 82	0.011 87	0.028 40	0.000 52	181	3
NZ-N7-9	266	467	0.569 46	0.048 23	0.004 79	0.180 23	0.016 84	0.027 09	0.000 66	172	4
NZ-N7-10	360	669	0.537 67	0.051 32	0.002 29	0.199 14	0.006 84	0.028 13	0.000 43	179	3
NZ-N7-11	218	420	0.519 58	0.050 94	0.004 08	0.198 36	0.014 62	0.028 23	0.000 61	179	4
NZ-N7-12	251	410	0.611 60	0.051 43	0.004 32	0.190 19	0.014 81	0.026 80	0.000 60	170	4
NZ-N7-13	137	329	0.414 37	0.052 02	0.002 89	0.200 26	0.009 45	0.027 91	0.000 48	177	3

### 3.3 锆石 Lu-Hf 同位素

岩石中锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.282 914 ~ 0.283 012,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于  $\pm 8.72 \sim \pm 12.28$  之间, Hf 同位素单阶段模式年龄 ( $T_{\text{DM1}}$ ) 和二阶段模式年龄 ( $T_{\text{DM2}}$ ) 分别变化于 342 ~ 482 Ma 和 437 ~ 663 Ma 之间(表 3)。

## 4 讨论

### 4.1 岩浆源区

在地球化学研究中,棉田花岗闪长岩属高钾钙碱性—钙碱性系列,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  介于 15.91 ~ 16.46 之间,  $\text{Mg}^\#$  值介于 44.7 ~ 46.6 之间, 它们表明岩石主要来自深部陆壳。Eu/Eu\* 值(0.76 ~ 1.00), 暗示长石结晶分异不明显。岩体富集轻稀土元素、贫重稀土元素, 以及 Nb、Ta 等高场强元素的明显亏损表明源区

可能残留石榴子石。

除火成岩的 Sr-Nd 同位素外, 锆石 Hf 同位素对岩浆源区性质也给出了很好的制约 (Amelin *et al.*, 1999, 2000; Griffin *et al.*, 2002; 图 7)。本次测试结果显示岩石中岩浆锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $\pm 8.72 \sim \pm 12.28$  (均  $> 0$ ), 且位于球粒陨石演化线和亏损地幔演化线之间, 落入了兴蒙造山带东段显生宙火成岩  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值分布范围(图 8) (Xiao *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2009), 并且与内蒙古霍林河主要源于增生弧壳的英安岩—流纹岩相似 (Guo *et al.*, 2009)。此外, 锆石 Hf 同位素成分变化范围较小, 表明岩石源区均一。结合其二阶段模式年龄  $T_{\text{DM2}}$  (437 ~ 663 Ma), 与新元古代—显生宙发生过地壳增生事件年龄一致 (Jahn *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2006), 认为岩石岩浆源区应是一种亏损的源区—新增生陆壳(新元古代到早

表 2 棉田花岗闪长岩主量元素、稀土元素和微量元素含量及有关参数

Table 2 Major, REE and trace element content and parameter of the granodiorite in Miantian

样品	NZ-Y-1	NZ-Y-2	NZ-Y-3	NZ-Y-4	NZ-Y-5	NZ-Y-6	NZ-Y-7	NZ-Y-8	NZ-Y-9
SiO <sub>2</sub>	62.19	63.13	64.08	63.04	63.22	63.10	63.70	62.61	63.41
TiO <sub>2</sub>	0.70	0.68	0.62	0.64	0.68	0.66	0.66	0.67	0.71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.31	16.24	15.97	16.11	15.97	16.46	16.05	15.91	16.37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.53	5.06	4.59	5.01	5.17	5.09	4.97	5.02	5.21
MnO	0.09	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08
MgO	2.31	2.19	1.98	2.11	2.17	2.08	2.19	2.12	2.24
CaO	4.88	4.53	2.82	4.66	4.46	4.45	4.49	4.88	4.48
Na <sub>2</sub> O	4.00	3.94	3.70	3.86	3.81	3.88	3.84	3.82	3.93
K <sub>2</sub> O	2.38	2.43	2.87	2.59	2.43	2.26	2.31	2.62	2.34
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
LOI	1.04	1.32	2.93	1.25	1.30	1.49	1.15	1.96	1.03
Total	99.64	99.80	99.82	99.56	99.49	99.75	99.63	99.92	100.00
ALK	6.38	6.37	6.57	6.45	6.24	6.14	6.15	6.44	6.27
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1.67	1.61	1.28	1.49	1.56	1.72	1.67	1.45	1.67
A/CNK	0.91	0.89	0.92	1.04	0.91	0.94	1.12	0.91	0.94
Mg <sup>#</sup>	44.70	45.30	45.40	45.50	45.60	46.00	46.10	46.20	46.60
La	20.80	19.20	16.90	18.80	19.00	21.00	18.80	18.50	17.20
Ce	43.40	39.60	35.50	37.30	39.30	43.80	38.90	37.10	35.30
Pr	5.14	4.65	4.13	4.21	4.67	5.24	4.59	4.29	4.15
Nd	18.90	16.90	14.80	14.80	17.40	18.80	16.90	15.50	15.00
Sm	3.95	3.45	2.94	2.98	3.63	4.03	3.43	3.18	3.08
Eu	0.90	0.85	0.69	1.05	0.84	0.89	0.89	0.88	0.84
Gd	2.97	2.66	1.99	3.47	2.93	3.21	2.85	2.79	2.67
Tb	0.47	0.41	0.29	0.50	0.45	0.51	0.43	0.43	0.41
Dy	3.11	2.65	1.86	3.01	2.95	3.25	2.71	2.63	2.51
Ho	0.62	0.54	0.37	0.60	0.60	0.67	0.56	0.54	0.52
Er	1.70	1.45	1.07	1.67	1.60	1.74	1.50	1.41	1.39
Tm	0.29	0.25	0.18	0.29	0.28	0.30	0.25	0.25	0.23
Yb	1.81	1.57	1.21	1.72	1.70	1.83	1.58	1.45	1.44
Lu	0.28	0.24	0.19	0.25	0.26	0.28	0.24	0.24	0.22
Y	17.70	15.80	10.10	15.90	16.60	18.80	15.70	14.90	14.80
ΣREE	104.00	94.40	82.10	90.70	95.60	105.60	93.60	89.20	85.00
LREE	93.10	84.70	75.00	79.10	84.80	93.80	83.50	79.50	75.60
HREE	11.30	9.80	7.20	11.50	10.80	11.80	10.10	9.74	9.39
LREE/HREE	8.27	8.66	10.47	6.88	7.88	7.95	8.25	8.16	8.05
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	8.24	8.77	10.02	7.84	8.02	8.23	8.53	9.15	8.57
δEu	0.80	0.86	0.87	1.00	0.79	0.76	0.87	0.90	0.90
δCe	1.03	1.03	1.04	1.03	1.02	1.02	1.03	1.02	1.02
Rb	73.40	73.30	91.70	88.40	72.80	65.00	66.60	77.30	71.90
Ba	418.00	420.00	479.00	458.00	420.00	409.00	431.00	537.00	439.00
Th	10.80	10.90	13.30	9.30	10.70	10.80	10.30	8.70	7.96
U	2.11	1.96	1.39	2.13	3.15	3.68	3.09	2.51	1.74
Nb	5.60	5.30	5.10	5.50	5.60	5.80	5.60	5.20	5.30
Ta	0.60	0.60	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.50	0.50
Sr	366.00	365.00	344.00	433.00	386.00	397.00	383.00	439.00	389.00
Nd	18.90	16.90	14.80	14.80	17.40	18.80	16.90	15.50	15.00
Zr	150.00	140.00	130.00	120.00	150.00	130.00	130.00	140.00	160.00
Hf	4.00	3.70	3.60	3.30	4.20	3.50	3.70	3.80	4.00
Nb/Ta	9.33	8.83	10.20	9.17	9.33	9.67	9.33	10.40	10.6
Rb/Sr	0.20	0.20	0.27	0.20	0.19	0.16	0.17	0.19	0.18
Hf/Th	0.37	0.34	0.27	0.35	0.39	0.33	0.36	0.44	0.50
La/Nb	3.71	3.62	3.31	3.42	3.39	3.62	3.36	3.56	3.25

注:主量元素单位为  $10^{-2}$ ;微量、稀土元素单位为  $10^{-6}$ ,  $ALK=K_2O+Na_2O$ ;  $A/CNK=Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ , 分子比;  $Na_2O/K_2O$  重量比;  $Mg^{\#}=100 \times (MgO/40.31)/(MgO/40.31+Fe_2O_3^T \times 2/159.7)$ .

古生代)部分熔融的产物。

#### 4.2 构造背景

棉田花岗闪长岩具有较高的 MgO、CaO 含量,

$Na_2O/K_2O$  的值为  $1.29 \sim 1.72 (> 1.17)$ , 显示形成于活动大陆边缘环境火成岩特征 (Gill, 1987; Francalanci *et al.*, 1993)。结合岩石属于 I 型花岗质岩

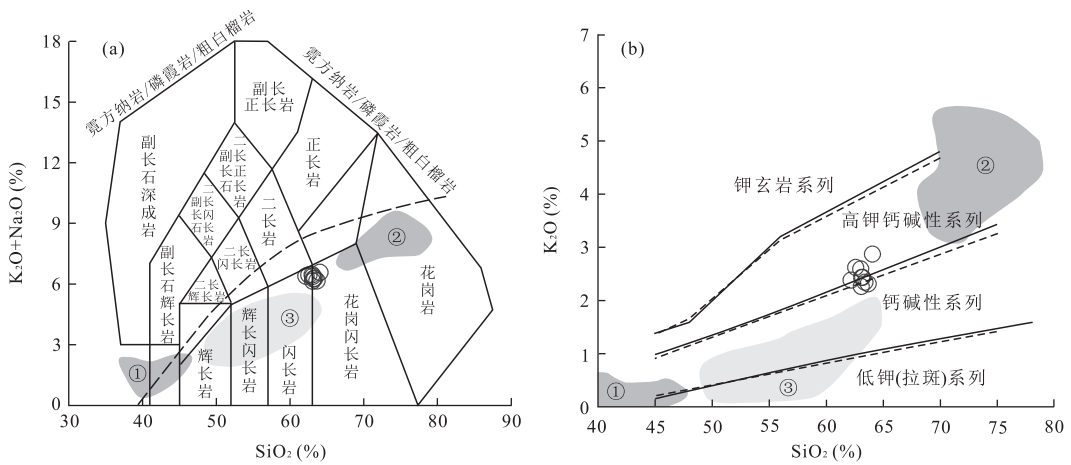


图 5 岩石 TAS(a) 和 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解(b)

Fig.5 TAS diagram and K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> diagram of the granodiorite in Miantian

a.分界线上方为碱性,下方为亚碱性,据 Irvine and Baragar,1971;①小兴安岭—张广才岭地区基性—超基性岩;②东宁—汪清—珲春地区中基性岩;③小兴安岭—张广才岭地区酸性岩(Wu *et al.*,2002;孙德有,2005b;许文良等,2008;Yu *et al.*,2012;Xu *et al.*,2013)

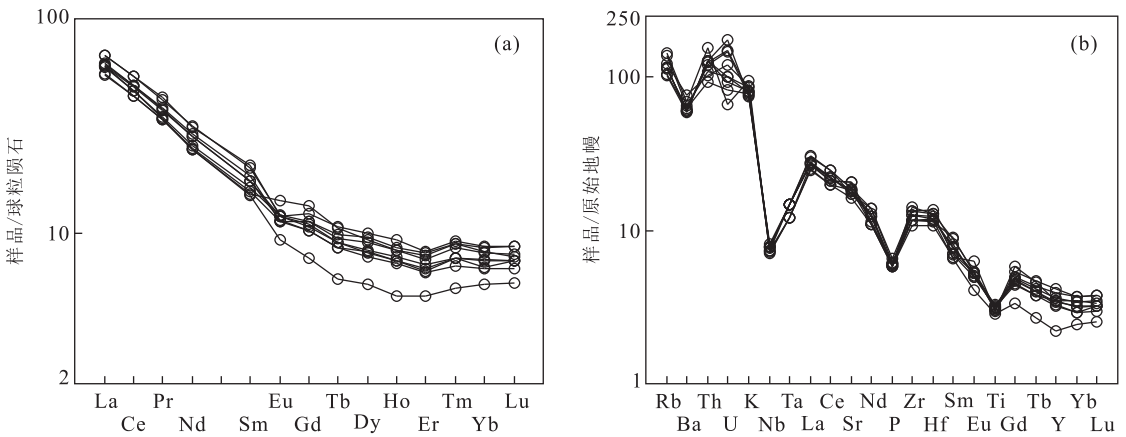


图 6 岩石稀土元素球粒陨石标准化配分图解(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.6 Chondrite-normalized REE distribution patterns and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams of the granodiorite  
a.标准化值据 Boynton,1984;b.标准化值据 Sun and McDonough,1989

表 3 棉田花岗岩闪长岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 LA-ICPMS zircon U-Pb analyses of the granodiorite in Miantian

样品	t(Ma)	<sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf(corr)	2σ	ε <sub>Hf</sub> (0)	ε <sub>Hf</sub> (t)	2σ	T <sub>DM1</sub> (Hf)	T <sub>DM2</sub> (Hf)	f <sub>Lu/Hf</sub>
NZ-N7-1	178	0.038 490	0.001 218	0.282 963	0.282 940	0.000 017	5.94	9.71	0.59	445	602	-0.96
NZ-N7-2	175	0.037 450	0.001 153	0.282 937	0.282 914	0.000 018	5.01	8.72	0.64	482	663	-0.97
NZ-N7-3	177	0.048 968	0.001 568	0.282 973	0.282 950	0.000 016	6.28	9.98	0.58	436	584	-0.95
NZ-N7-4	179	0.025 767	0.000 773	0.282 979	0.282 956	0.000 018	6.50	10.34	0.64	418	562	-0.98
NZ-N7-5	183	0.040 833	0.001 175	0.283 011	0.282 988	0.000 016	7.62	11.50	0.55	377	491	-0.96
NZ-N7-6	173	0.042 915	0.001 219	0.283 007	0.282 984	0.000 016	7.49	11.15	0.57	383	506	-0.96
NZ-N7-7	175	0.042 466	0.001 236	0.283 025	0.283 002	0.000 015	8.15	11.85	0.54	356	462	-0.96
NZ-N7-8	181	0.043 538	0.001 231	0.282 954	0.282 931	0.000 016	5.63	9.46	0.56	458	620	-0.96
NZ-N7-9	172	0.059 948	0.001 793	0.283 017	0.282 994	0.000 017	7.86	11.44	0.61	373	486	-0.95
NZ-N7-10	179	0.044 000	0.001 264	0.283 035	0.283 012	0.000 017	8.50	12.28	0.59	342	437	-0.96
NZ-N7-11	179	0.046 063	0.001 391	0.282 960	0.282 937	0.000 012	5.82	9.59	0.42	452	610	-0.96
NZ-N7-12	170	0.052 283	0.001 667	0.283 018	0.282 995	0.000 015	7.90	11.45	0.55	370	484	-0.95
NZ-N7-13	177	0.045 334	0.001 643	0.282 992	0.282 969	0.000 015	6.96	10.65	0.54	409	541	-0.95

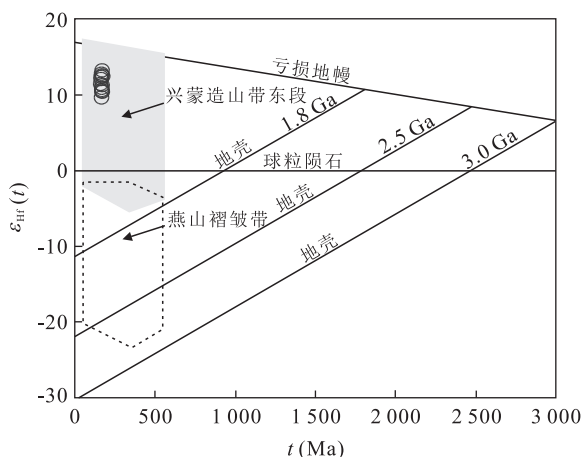


图 7 岩石的 Hf 同位素特征

Fig.7 Hf isotopic compositions of the granodiorite

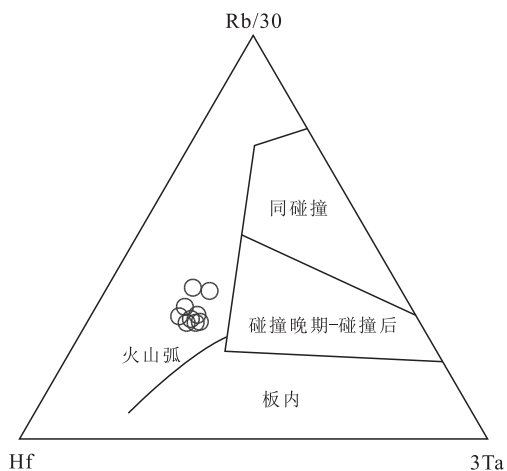
据 Yang *et al.*, 2006

图 9 岩石 Hf-Rb/30-3Ta 判别图解

Fig.9 Hf-Rb/30-3Ta diagram of the granodiorite

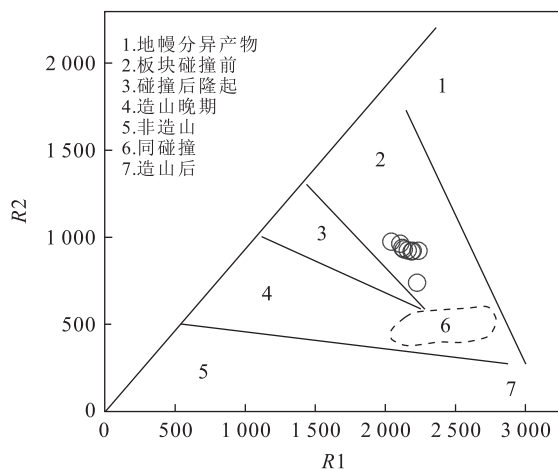
据 Brown *et al.*, 1984

图 8 岩石 R1-R2 判别图解

Fig.8 R1-R2 factor diagram of the granodiorite

据 Bachelor and Bowden, 1985

类, 岩石化学特征  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量 15.91%~16.46% (>13%),  $\text{CaO}$  含量 2.82%~4.88% (>1.73%),  $\text{K}_2\text{O}$  含量 2.34%~2.87% (<4.0%),  $\text{ALK}$  含量 6.14%~6.57% (<8.0%), 判断出岩石形成于挤压的火山弧环境(邱家骧, 2004)。在 Hf-Rb/30-3Ta 判别图解上(图 9), 岩石全部落在火山弧区域; 在 R1-R2 判别图解中(图 8), 样品落入板块碰撞前区域, 相当于活动大陆边缘。微量元素中, Zr/Y 的比值为 8.67~11.00, 所有数据的值都符合大陆边缘安山岩 Zr/Y 值在 4~12 之间的化学特征(Condie, 1989)。岩石 La/Nb 比值 1.56~3.57(平均 2.78), 总体符合活动大陆边缘 La/Nb 比值高于 2 的特征(Salters and Hart, 1991)。

吉黑东部(东宁—汪清—珲春—线)发育早—中

侏罗世(173~190 Ma)陆缘的钙碱性火山岩组合(许文良等, 2008; 裴福萍等, 2009), 而小兴安岭—张广才岭地区发育同时代类似弧后盆地的伸展环境下的双峰式火山岩组合(唐杰等, 2011; Yu *et al.*, 2012; 徐美君等, 2013)(图 3a), 自东向西  $\text{K}_2\text{O}$  及  $\text{SiO}_2$  含量具有增高的趋势(图 3b), 这种空间变化表明棉田岩体的形成与环太平洋构造体系有关。

有关古太平洋构造体系俯冲于欧亚大陆之下的开始时间一直存在争论。目前主要有两种观点, 一种认为是晚三叠世(彭玉鲸和陈跃军, 2007), 而另一种认为是早—中侏罗世(Xu *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2011)。东北地区, 晚三叠世火山岩广泛出露, 呈面型展布, 与由板块俯冲形成的火成岩呈平行海沟带状展布的特点完全不同, 难以用太平洋板块俯冲模式来解释(Wu *et al.*, 2004; 闻爽等, 2013; Wang *et al.*, 2014, 未发表)。晚三叠世, 大规模发育的 A 型花岗岩和镁铁质岩体(岩墙), 表明整个东北地区此时都处于拉张构造环境中(Wu *et al.*, 2007b; Xu *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2011; 魏红艳等, 2012)。此外, 结合延边地区晚古生代古生物群、古地磁、沉积建造的特征表明(彭玉鲸, 1996; 张艳斌, 2002), 延边晚三叠纪花岗岩是在古亚洲洋消失, 南北两大板块发生陆陆碰撞对接后的构造背景下形成的, 属于造山后构造环境。因此, 认为晚三叠世东北地区为古亚洲洋构造域控制, 古太平洋构造体系俯冲作用的开始在早—中侏罗世, 并形成吉黑东部棉田等钙碱性火山岩组合及兴安岭—张广才岭地区同时代双峰式火成岩组合。



## 5 结论

(1) 获得延边地区棉田岩体中花岗闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 加权平均年龄值为  $177 \pm 2$  Ma, MSWD=1.13, 属早侏罗世。

(2) 棉田岩体中花岗闪长岩的原始岩浆起源于新增生陆壳(新元古代到早古生代)部分熔融, 属于 I 型花岗质岩类。

(3) 棉田花岗闪长岩岩体形成于古太平洋板块向欧亚大陆俯冲下的火山弧环境。

致谢: 匿名审稿专家对文章提出了建设性的修改意见, 在此致以最诚挚的谢意!

## References

Amelin, Y., Lee, D. C., Halliday, A. N., et al., 1999. Nature of the Earth's Earliest Crust from Hafnium Isotopes in Single Detrital Zircons. *Nature*, 399(6733): 252–255. doi: 10.1038/20426

Amelin, Y., Lee, D. C., Halliday, A. N., 2000. Early-Middle Archean Crustal Evolution Deduced from Lu-Hf and U-Pb Isotope Studies of Single Zircon Grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(24): 4205–4225. doi: 10.1016/S0016-7037(00)00493-2

Anderson, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That Do Not Report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192(1–2): 59–79.

Bachelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrologic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters. *Chemical Geology*, 48(1–4): 43–55. doi: 10.1016/0009-2541(85)90034-8

Blichert-Toft, J., 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. doi: 10.1016/S0012-821X(97)00040-X

Boynton, W. V., 1984. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., ed., Rare Earth Elements Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 63–114.

Brown, G. C., Thorpe, R. S., Webb, P. C., 1984. The Geochemical Characteristics of Granitoids in Contrasting Arcs and Comments on Magma Sources. *Journal of the Geological Society*, 141: 411–426. doi: 10.1144/gsjgs.141.3.0413

Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province, 1988. Regional Geology of Jilin Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Chen, B., Jahn, B. M., Tian, W., 2009. Evolution of the Solonker Suture Zone: Constrains from Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopic Ratios and Whole-Rock Sr-Nd Isotope Compositions of Subduction- and Collision-Related Magmas and Forearc Sediments. *Journal of Asian Earth Science*, 34(3): 245–257. doi: 10.1016/j.jseae.2008.05.007

Chu, N. C., Taylor, R. N., Chavagnac, V., et al., 2002. Hf Isotope Ratio Analysis Using Multi-Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: An Evaluation of Isobaric Interference Corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567–1574. doi: 10.1039/B206707B

Condie, K. C., 1989. Geochemical Changes in Basalts and Andesites across the Archean-Proterozoic Boundary: Identification and Significance. *Lithos*, 23(1–2): 1–18. doi: 10.1016/0024-4937(89)90020-0

Franca Lanci, L., Taylor, S. R., McCulloch, M. T., et al., 1993. Geochemical and Isotopic Variations in the Calc-Alkaline Rocks of Aeolian Arc, Southern Tyrrhen Sea, Italy: Constraints on Magma Genesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(3): 300–313. doi: 10.1007/BF00286923

Fang, W. C., 1992. Granite and Mineralization in Jilin Province. Jilin Science and Technology Press, Changchun (in Chinese).

Ge, W. C., Wu, F. Y., Zhou, C. Y., et al., 2007. Porphyry Cu-Mo Deposits in the Eastern Xing'an-Mongolian Orogenic Belt: Mineralization Ages and Their Geodynamic Implications. *Chinese Science Bulletin*, 52(24): 3416–3427. doi: 10.1007/s11434-007-0466-8

Geng, J. Z., Li, H. K., Zhang, J., et al., 2011. Zircon Hf Isotope Analysis by Means of LA-MC-ICP-MS. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1508–1513 (in Chinese with English abstract).

Gill, J. B., 1987. Early Geochemical Evolution of an Oceanic Island Arc and Back Arc: Fiji and the South Fiji Basin. *The Journal of Geology*, 95(5): 589–615.

Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3–4): 237–269. doi: 10.1016/S0024-4937(02)00082-8

Guo, F., Fan, W. M., Li, C. W., et al., 2009. Early Cretaceous Highly Positive  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  Felsic Volcanic Rocks from the Hingan Mountains, NE China: Origin and Implications for Phanerozoic Crustal Growth. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1395–1411.

- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8 (5): 523—548. doi: 10.1139/e71-055
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Chen, B., 2000. Massive Granitoid Generation in Central Asia; Nd Isotopic Evidence and Implication for Continental Growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23(2): 82—92.
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1—2): 537—571. doi: 10.1093/petrology/egp082
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. No. 4. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley, California.
- Meng, Q. L., Zhou, Y. C., Chai, S. L., 2001. Porphyry Copper-Hydrothermal Vein Type Gold Deposit in Yanbian Area, Eastern China. Jilin Science and Technology Press, Changchun. (in Chinese).
- Nowell, G. M., Kempton, P. D., Noble, S. R., et al., 1998. High Precision Hf Isotope Measurements of MORB and OIB by Thermal Ionization Mass Spectrometry: Insights into the Depleted Mantle. *Chemical Geology*, 149(3—4): 211—233. doi: 10.1016/S0009-2541(98)00036-9
- Patchett, P. J., Tatsumoto, M., 1980. A Routine High-Precision Method for Lu-Hf Isotope Geochemistry and Chronology. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 75(3): 263—267. doi: 10.1007/BF01166766
- Pan, L. M., 1991. Geological and Geochemical Characteristics of the Granitic Masses in the Xintian-Miantian Area, Yanbian. *Jilin Geology*, (3): 61—69 (in Chinese with English abstract).
- Pang, W., 2009. Metallogenic Model of Epithermal and Low-Sulfidation Gold Deposit, Yanbian Area (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese).
- Pei, F. P., Xu, W. L., Yang, D. B., et al., 2008. Mesozoic Volcanic Rocks in the Southern Songliao Basin; Zircon U-Pb Ages and Their Constraints on the Nature of Basin Basement. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(5): 603—617 (in Chinese with English abstract).
- Pei, F. P., Xu, W. L., Yang, D. B., et al., 2009. Heterogeneity of Late Mesozoic Deep Lithosphere beneath the Northeastern North China; Evidence from Elemental and Sr-Nd Isotopic Geochemistry of Mesozoic Volcanic Rocks in the Southern Jilin Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1962—1974 (in Chinese with English abstract).
- Peng, Y. J., 1996. Division of Carboniferous-Permian Biogeographic Province in Jilin Province. *Jilin Geology*, 15(1): 12—18 (in Chinese with English abstract).
- Peng, Y. J., Chen, Y. J., 2007. Location of Structural Boundary between Ji-Hei Orogenic Zone and Kaiyuan-Shancheng Town Section of North China Platform. *Global Geology*, 26(1): 1—6, 74 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. X., 2004. Opening-Closing Tectonics and Magmatic Activity. *Geological Bulletin of China*, 23(3): 222—231 (in Chinese with English abstract).
- Salters, V. J. M., Hart, S. R., 1991. The Mantle Sources of Ocean Ridges, Island and Arcs: The Hf-Isotope Connection. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2—4): 364—380. doi: 10.1016/0012-821X(91)90216-5
- Scherer, E., Münker, C., Mezger, K., 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium Clock. *Science*, 293(5530): 683—687. doi: 10.1126/science.1061372
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implication for Mantle Composition and Processes. In: Saunderson, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication*, 2: 313—345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Sun, D. Y., Wu, F. Y., Gao, S., et al., 2005a. Confirmation of Two Episodes of A-Type Granite Emplacement during Late Triassic and Early Jurassic in the Central Jilin Province, and Their Constraints on the Structural Pattern of Eastern Jilin-Heilongjiang Area, China. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 263—275 (in Chinese with English abstract).
- Sun, D. Y., Suzuki, K., Wu, F. Y., et al., 2005b. CHIME Dating and Its Application for Mesozoic Granites of Huanggoushan, Jilin Province. *Geochimica*, 34(4): 305—314 (in Chinese with English abstract).
- Tang, J., Xu, W. L., Wang, F., et al., 2011. Petrogenesis of Bimodal Volcanic Rocks from Maoershan Formation in Zhangguangcai Range; Evidence from Geochronology and Geochemistry. *Global Geology*, 30(4): 508—520 (in Chinese with English abstract).
- Weaver, B. L., 1991. The Origin of Ocean Island Basalt End-

- Member Compositions; Trace Element and Isotopic Constraints, *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2-4): 381-397. doi:10.1016/0012-821X(91)90217-6
- Wei, H. Y., Sun, D. Y., Ye, S. Q., et al., 2012. Zircon U-Pb Ages and Its Geological Significance of the Granitic Rocks in the Yichun-Hegang Region, Southeastern Xiao Hinggan Mountains. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37 (Suppl.): 51-59 (in Chinese with English abstract).
- Wen, S., Li, B. L., Li, L. B., et al., 2013. Zircon U-Pb Age and Geochemistry of Nanquanyan Diorite in Lanjia Gold Deposit, Jilin Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(2): 305-315 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., 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, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S., et al., 2000. Phanerozoic Crustal Growth: U-Pb and Sr-Nd Isotopic Evidence from the Granites in Northeastern China. *Tectonophysics*, 328(1-2): 89-113. doi:10.1016/S0040-1951(00)00179-7
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Li, H. M., et al., 2002. A-Type Granites in Northeastern China: Age and Geochemical Constraints on their Petrogenesis. *Chemical Geology*, 187: 143-173.
- Wu, F. Y., Wilde, S. A. W., Zhang, G. L., et al., 2004. Geochronology and Petrogenesis of the Post-Orogenic Cu-Ni Sulfide-Bearing Mafic-Ultramafic Complexes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 781-797. doi:10.1016/S1367-9120(03)00114-7
- Wu, F. Y., Yang, Y. H., Xie, L. W., et al., 2006. Hf Isotopic Compositions of the Standard Zircons and Baddeleyites Used in U-Pb Geochronology. *Chemical Geology*, 234(1-2): 105-126. doi:10.1016/j.chemgeo.2006.05.003
- Wu, F. Y., Yang, J. H., Lo, C. H., et al., 2007a. 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. doi:10.1111/j.1440-1738.2007.00564.x
- Wu, F. Y., Zhao, G. C., Sun, D. Y., et al., 2007b. The Hulan Group: Its Role in the Evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30: 542-556. doi:10.1016/j.jseae.2007.01.003
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Ge, W. C., et al., 2011. Geochronology of the Phanerozoic Granitoids in Northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1-30. doi:10.1016/j.jseae.2010.11.014
- Xiao, W. J., Zhang, L. C., Qin, K. Z., et al., 2004. Paleozoic Accretionary and Collisional Tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the Continental Growth of Central Asian. *American Journal of Science*, 304(4): 370-395. doi:10.2475/ajs.304.4.370
- Xu, W. L., Ji, W. Q., Pei, F. P., et al., 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. doi:10.1016/j.jseae.2008.07.001
- Xu, W. L., Pei, F. P., Wang, F., et al., 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. doi:10.1016/j.jseae.2013.04.003
- Xu, W. L., Ge, W. C., Pei, F. P., et al., 2008. Geochronological Frame of Mesozoic Volcanism in NE China and Its Significance. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(Suppl.): 286-287 (in Chinese with English abstract).
- Xu, M. J., Xu, W. L., Wang, F., et al., 2013. Geochronology and Geochemistry of the Early Jurassic Granitoids in the Central Lesser Xing'an Range, NE China and Its Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 354-368 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Shao, J. A., et al., 2006. Constraints on the Timing of Uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246: 336-352. doi:10.1016/j.epsl.2006.04.029
- Yu, J. J., Wang, F., Xu, W. L., et al., 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. doi:10.1016/j.lithos.2012.03.016
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353-370. doi:10.1111/j.1751-908X.2004.tb00755.x
- Yuan, H. L., Wu, F. Y., Gao, S., et al., 2003. Determination of U-Pb Age and Rare Earth Element Concentrations of Zircons from Cenozoic Intrusions in Northeastern China by Laser Ablation ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511-1520 (in Chinese).

- Zhang, Y. B., 2002. The Isotopic Geochronologic Frame of Granitic Magmatism in Yanbian Area(Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese).
- Zhang, Y. B., Wu, F. Y., Wilde, S. A., et al., 2004. Zircon U-Pb Ages and Tectonic Implications of 'Early Paleozoic' Granitoids at Yanbian, Jilin Province, Northeast China. *Island Arc*, 13(4): 484—505. doi: 10.1111/j.1440—1738.2004.00442.x
- Zhao, C. J., Peng, Y. J., Dang, Z. X., et al., 1996. Tectonic Framework and Crust Evolution of Eastern Jilin and Heilongjiang Provinces. Liaoning University Publishing House, Shenyang, 124—139 (in Chinese).
- Zhao, H. G., 2007. Study on the Metallogenesis and Models in Mesozoic Epithermal Gold Deposits in Yanbian, Jilin Province(Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese).
- Zhao, Q. G., Xu, W. L., Jin, K., et al., 2005. The Magma Source of Mesozoic Volcanic Rocks in Yanbian Area: Evidence from Sr-Nd Isotopes and Deep-Seated Xenoliths(Xenocrysts). *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 35(4): 416—422 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Yang, Z. Y., Ma, X. H., 1994. Geotectonic Transition from Paleasian System and Paleotethyan System to Paleopacific Active Continental Margin in Eastern Asia. *Scientia Geologica Sinica*, 29(2): 105—119 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. B., Wilde, S. A., Zhang, X. Z., et al., 2009. The Onset of Pacific Margin Accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang High-Pressure Metamorphic Belt. *Tectonophysics*, 478(3—4): 230—246. doi: 10.1016/j.tecto.2009.08.009
- 附中文参考文献**
- 方文昌, 1992. 吉林省花岗岩类及成矿作用. 长春: 吉林科学技术出版社.
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等, 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定. 地质通报, 30(10): 1508—1513.
- 吉林省地质矿产局, 1988. 吉林省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 孟庆丽, 周永昶, 柴社立, 2001. 中国延边东部斑岩—热液脉型铜金矿床. 吉林: 吉林科学技术出版社.
- 潘丽敏, 1991. 延边地区新田—棉田花岗质岩体地质地球化学特征. 吉林地质, (3): 61—69.
- 逢伟, 2009. 延边地区浅成低温低硫化型金矿床的成矿模式研究(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 等, 2008. 松辽盆地南部中生代火山岩: 锆石 U-Pb 年代学及其对基底性质的制约. 地球科学——中国地质大学学报, 33(5): 603—617.
- 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 等, 2009. 华北克拉通东北缘岩石圈深部物质组成的不均一性: 来自吉林南部中生代火山岩元素及 Sr-Nd 同位素地球化学的证据. 岩石学报, 25(8): 1962—1974.
- 彭玉鲸, 1996. 吉林省石炭—二叠纪生物地理区的划分. 吉林地质, 15(1): 12—18.
- 彭玉鲸, 陈跃军, 2007. 吉黑造山带与华北地台开原—山城镇段构造边界位置. 世界地质, 26(1): 1—6, 74.
- 邱家骧, 2004. 开合构造与岩浆活动. 地质通报, 23(3): 222—231.
- 孙德有, 吴福元, 高山, 等, 2005a. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约. 地学前缘, 12(2): 263—275.
- 孙德有, 铃木和博, 吴福元, 等, 2005b. 吉林省南部荒沟山区中生代花岗岩 CHIME 定年. 地球化学, 34(4): 305—314.
- 唐杰, 许文良, 王枫, 等, 2011. 张广才岭帽儿山组双峰式火山岩成因: 年代学与地球化学证据. 世界地质, 30(4): 508—520.
- 魏红艳, 孙德有, 叶松青, 等, 2012. 小兴安岭东南部伊春—鹤岗地区花岗质岩石锆石 U-Pb 年龄测定及其地质意义. 地球科学——中国地质大学学报, 37(增刊): 51—59.
- 闻爽, 李碧乐, 李立宝, 等, 2013. 吉林省兰家金矿南泉眼闪长岩 U-Pb 年代学和地球化学特征. 地球科学——中国地质大学学报, 38(2): 305—315.
- 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.
- 许文良, 葛文春, 裴福萍, 等, 2008. 东北地区中生代火山作用的年代学格架及其构造意义. 矿物岩石地球化学通报, 27(增刊): 286—287.
- 徐美君, 许文良, 王枫, 等, 2013. 小兴安岭中部早侏罗世花岗质岩石的年代学与地球化学及其构造意义. 岩石学报, 29(2): 354—368.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 等, 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报, 48(14): 1511—1520.
- 张艳斌, 2002. 延边地区花岗质岩浆活动的同位素地质年代学格架(博士论文). 长春: 吉林大学.
- 赵春荆, 彭玉鲸, 党增欣, 等, 1996. 吉黑东部构造格架及地壳演化. 沈阳: 辽宁大学出版社, 124—139.
- 赵宏光, 2007. 延边中生代浅成热液铜金矿床的成矿模式研究(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 赵全国, 许文良, 靳克, 等, 2005. 延边地区中生代火山岩的岩浆源区: 来自 Sr-Nd 同位素和深源捕虏体(晶)的证据. 吉林大学学报(地球科学版), 35(4): 416—422.
- 赵越, 杨振宇, 马醒华, 1994. 东亚大地构造发展的重要转折. 地质科学, 29(2): 105—119.