

· 专题研究 ·

小兴安岭-张广才岭地区晚古生代至中生代 花岗岩的成因及其地质意义

葛茂卉¹, 张进江², 刘 恺³, 王 盟⁴, 李 壮⁵

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 3. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029; 4. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 5. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249)

摘要: 中国东北地区显生宙花岗岩的成因一直是中亚造山带东段研究的热点之一, 尤其是小兴安岭-张广才岭地区的花岗岩, 其成因及形成的大地构造背景一直存在较大争议。本文新获得小兴安岭-张广才岭铁力和依兰地区的二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 188 ± 1 Ma 和 257 ± 3 Ma。地球化学数据显示, 两地区的二长花岗岩均为 I 型花岗岩, 并且富集大离子亲石元素(Th 和 U 等)和轻稀土元素, 亏损高场强元素(Nb 和 Ta 等)和重稀土元素, 具有弧岩浆岩的地球化学特征。锆石 Hf 同位素数据显示, 铁力地区二长花岗岩的岩浆源区可能来自于中新元古代的地下壳部分熔融。综合前人在小兴安岭-张广才岭地区已发表的花岗岩类岩石的地质年代学和地球化学数据, 初步推测小兴安岭-张广才岭地区在晚古生代至中生代期间处于活动大陆边缘环境。同时, 小兴安岭-张广才岭地区晚古生代至中生代的岩浆岩具有自东向西形成时代逐渐变年轻的趋势, 这可能是由于东侧的牡丹江洋在晚古生代至中生代期间俯冲角度逐渐变缓造成的。

关键词: 花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; 活动大陆边缘; 小兴安岭-张广才岭; 中亚造山带

中图分类号: P597; P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)04-0385-21

Petrogenesis of the Late Paleozoic to Mesozoic granite from the Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains and its geological implications

GE Mao-hui¹, ZHANG Jin-jiang², LIU Kai³, WANG Meng⁴ and LI Zhuang⁵

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 5. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: Extensive Phanerozoic granitoids in northeastern China have constituted one of the hotspots in the study of granite in the eastern Central Asian Orogenic Belt. In particular, the petrogenesis and tectonic affinity of granites in the Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains have always been controversial. In this study, zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the monzogranites from the Tieli and Yilan areas in the Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains yielded crystallization ages of 188 ± 1 Ma and 257 ± 3 Ma, respectively. The geochemical data show that these monzogranites belong to I-type granite and are characterized by enrichment of LILE (e. g., Th

收稿日期: 2019-08-22; 接受日期: 2020-05-25; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41902240); 中国地质调查局资助项目(DD20190004, DD20190685); 中国地质科学院地质研究所基本科研业务费资助项目(J2014)

作者简介: 葛茂卉(1990-), 男, 汉族, 博士, 助理研究员, 从事构造地质学研究工作, E-mail: gmh19900125@126.com; 通讯作者: 张进江(1964-), 男, 汉族, 博士, 教授, 从事构造地质学研究工作, E-mail: zhjj@pku.edu.cn.

and U) and LREE and depletion of HFSE (e. g., Nb and Ta) and HREE, which are typical for continental arc-type granites. Zircon Hf isotopic data indicate that the granitic magma in the Tieli area was derived from partial melting of Meso-to Neoproterozoic lower crust. Combined with previously published geochronological and geochemical data, it is inferred that the Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains was under an active continental margin setting during the Late Paleozoic to Mesozoic. Moreover, the Late Paleozoic to Mesozoic granitoids show a westward increasingly younger trend in the whole Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains. The authors hold that this temporal and spatial relationship resulted from the flattening westward subduction of the Mudanjiang Ocean between the Jiamusi and Songnen blocks.

Key words: granite; zircon U-Pb age; an active continental margin; Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains; Central Asian Orogenic Belt

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41902240); Project of China Geological Survey (DD20190004, DD20190685); Basic Scientific Research Fund of Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (J2014)

作为地球上分布最广泛的一类岩石,花岗岩可产生于不同的构造背景下(Maniar and Piccoli, 1989; Barbarin, 1999; 吴福元等, 2017)。Pitcher(1983)根据不同大地构造环境下形成的花岗质岩浆特征,将花岗岩划分为大陆裂谷型、大陆岛弧型、大陆碰撞型、后造山型、大洋岛弧型和洋中脊/洋岛型等6种类型。后来的学者们通过对不同构造环境下的花岗岩地球化学成分进行统计分析,进而提出多种构造判别图解(Pearce *et al.*, 1984; Maniar and Piccoli, 1989)。由此可见,花岗岩与大地构造环境之间存在密切的联系,为探索大陆地壳的构造演化提供了重要的指示意义(Maniar and Piccoli, 1989; Wu *et al.*, 2011)。

东北地区是我国显生宙岩浆岩最为发育的地区,形成大量的古生代至中生代的花岗岩(吴福元等, 1999; Wu *et al.*, 2011)。虽然前人对该地区岩体进行过很多年代学和地球化学方面的研究,但是花岗岩的成因及其形成构造环境一直存在争议,尤其是小兴安岭-张广才岭地区的花岗岩(Wu *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2017; Ge *et al.*, 2017, 2018, 2019; Zhao *et al.*, 2018)。一种观点认为是古亚洲洋闭合后,中亚造山带内发生拆沉作用而产生大量岩浆上涌形成的(Xu *et al.*, 2009, 2013; Meng *et al.*, 2011); 另一种观点则认为产生于古太平洋在俯冲过程中形成的弧后拉张环境(Yu *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2015; Ma *et al.*, 2015); 最近,越来越多的学者认为存在于佳木斯地块与松嫩地块之间的牡丹江洋为古太平洋的分支,小兴安岭-张广才岭岩浆岩带是牡丹江洋西向俯冲形成的岩浆弧

(Dong *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2017; Ge *et al.*, 2017, 2018, 2019),与东侧的黑龙江蓝片岩一起组成了弧-沟体系(Zhou *et al.*, 2009, 2017)。

此外,关于小兴安岭-张广才岭地区岩浆岩的年代学格架、岩石组合以及时空分布特征也并不是很清楚。Ge等(2017, 2018)曾对小兴安岭-张广才岭地区晚古生代至中生代的花岗岩进行初步的归纳总结,提出该地区分布的花岗岩形成时代具有自东向西逐渐变年轻的趋势,但是不足之处是没有考虑到中国东北地区自白垩纪以来发生的大规模走滑运动,尤其是郯庐断裂北支——佳木斯-依兰断裂对小兴安岭-张广才岭岩浆岩带走滑错动的影响。

鉴于此,本文分别对佳木斯-依兰断裂两侧的小兴安岭-张广才岭花岗岩进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年、全岩地球化学和锆石 Lu-Hf 同位素等方面的研究,并结合前人的研究数据,尝试消除佳木斯-依兰断裂走滑位移对该地区岩体分布的影响,重新厘定小兴安岭-张广才岭地区花岗岩的时空分布规律,并探讨其岩浆成因及构造环境。

1 区域地质背景与样品特征

中国东北地区位于中亚造山带的最东缘(图1a),自西向东主要由额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块、佳木斯地块以及那丹哈达地体组成,各地块间分别以新林-喜桂图缝合带、贺根山-黑河缝合带、牡丹江缝合带和跃进山断裂相分割(黑龙江省地质矿产局, 1993; Wu *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2009)。其中,松嫩地块位于东北地区中部,主要由西侧的大

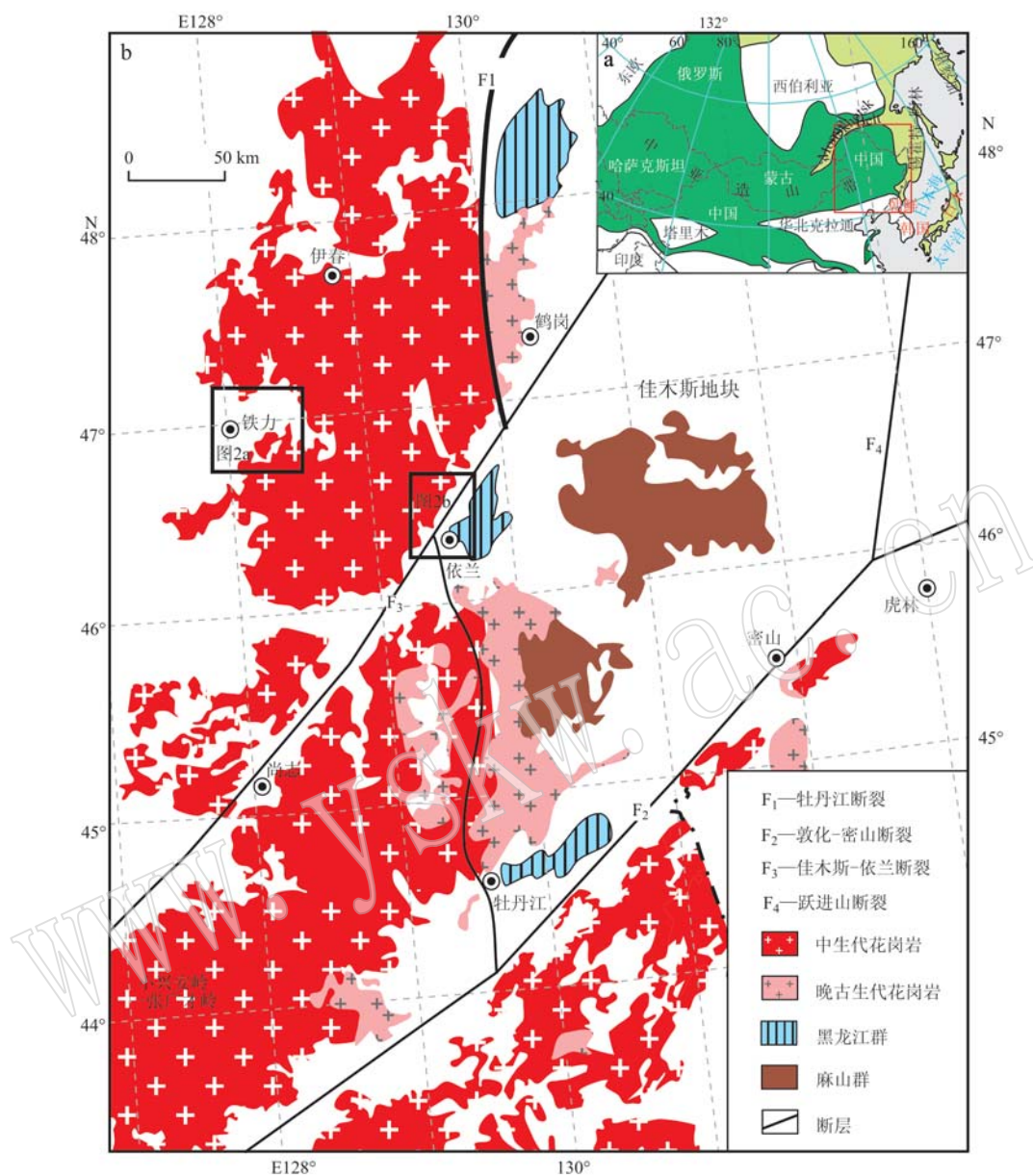


图 1 中亚造山带构造地质单元划分简图(a, Safonova and Santosh, 2014)和小兴安岭-张广才岭地区岩浆岩分布简图 (b, 据 Zhou *et al.*, 2009 和 Wu *et al.*, 2011 修改)

Fig. 1 Schematic tectonic map showing the main subdivisions of Central Asian Orogenic Belt (a, modified after Safonova and Santosh, 2014) and distribution of magmatic rocks in the Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains (modified from Zhou *et al.*, 2009 and Wu *et al.*, 2011)

兴安岭南段、中部的松辽盆地以及东侧的小兴安岭-张广才岭组成。大兴安岭南段发育大量的石炭纪至白垩纪的花岗岩,伴有少量的古生代和新生代地层分布(黑龙江省地质矿产局, 1993; Wu *et al.*, 2011; Dong *et al.*, 2017)。松辽盆地作为东北地区规模最大的陆相含油气盆地,面积达 260 000 km²,盆地基底主要由古生代-中生代花岗岩和古生代地层组成,盆地南缘有古元古代的花岗片麻岩出露,被认为是

来自华北板块的构造岩片(Wu *et al.*, 2001, 2011; Gao *et al.*, 2007; Pei *et al.*, 2007)。

小兴安岭-张广才岭早期被认为是由大量的古生代花岗质岩石和零星分布的古生代地层组成,并且这些花岗质岩石构成了一条巨型的南北向岩浆岩带(图 1b; 黑龙江省地质矿产局, 1993)。这些花岗质岩石类型主要为正长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩和少量的碱性花岗岩等(刘恺等,

2016)。但是近年来,随着高精度锆石 U-Pb 定年技术的普遍应用,之前很多被认为是早古生代的岩体时代陆续被重新更正为晚古生代和中生代(Wu *et al.*, 2000, 2011; Meng *et al.*, 2011; 魏红艳等, 2012; Yang *et al.*, 2015), 仅有少量花岗质岩体形成于早古生代(刘建峰等, 2008; Wu *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2012, 2016; 魏连喜等, 2013; Dong *et al.*, 2017)。大量研究表明,中生代花岗岩主要由石英、斜长石、钾长石、黑云母和角闪石组成,常含有榍石、锆石和磷灰石等副矿物,并且属于中钾和高钾钙碱性系列,其 $A/CNK < 1.1$, $Na/K > 1$, P_2O_5 含量随 SiO_2 含量增加具有降低的趋势,显示 I 型花岗岩的地球化学特征(刘恺等, 2016; Liu *et al.*, 2017; Ge *et al.*, 2017, 2018)。Wu 等(2003a, 2003b)提出这些 I 型花岗岩在侵位、冷却过程中经历了长期的结晶分异过程,是我国典型的高分异型

花岗岩。其 Sr-Nd 同位素和锆石 Lu-Hf 同位素表明这些中生代花岗岩为新生陆壳的组成部分,记录了中亚造山带显生宙期间巨量的陆壳增生过程(Wu *et al.*, 2000; Jahn *et al.*, 2000a, 2000b, 2004)。

样品 H15-09 采自铁力市桃山镇东侧约 1 km 处的桃山镇岩体(图 2a), 采样点坐标为 $N46^{\circ}55'05''$, $E128^{\circ}11'06''$, 在 1:20 万地质图上属于晚古生代花岗岩。该岩体呈北东向展布, 出露面积约 85 km^2 , 主体岩性为一套肉红色中细粒二长花岗岩, 侵入到古生代地层中, 被白垩纪地层角度不整合覆盖。野外观察发现, 岩体片麻理比较发育, 后期被基性岩脉侵入(图 3a)。镜下观察显示, 二长花岗岩主要矿物组成为石英($\sim 30\%$)、钾长石($\sim 35\%$)、斜长石($\sim 25\%$)、黑云母($\sim 5\%$)以及少量的锆石、榍石、磁铁矿和磷灰石等副矿物($< 5\%$)(图 3b)。

样品 18HL-07 采自依兰县德裕镇东侧约 2 km 处

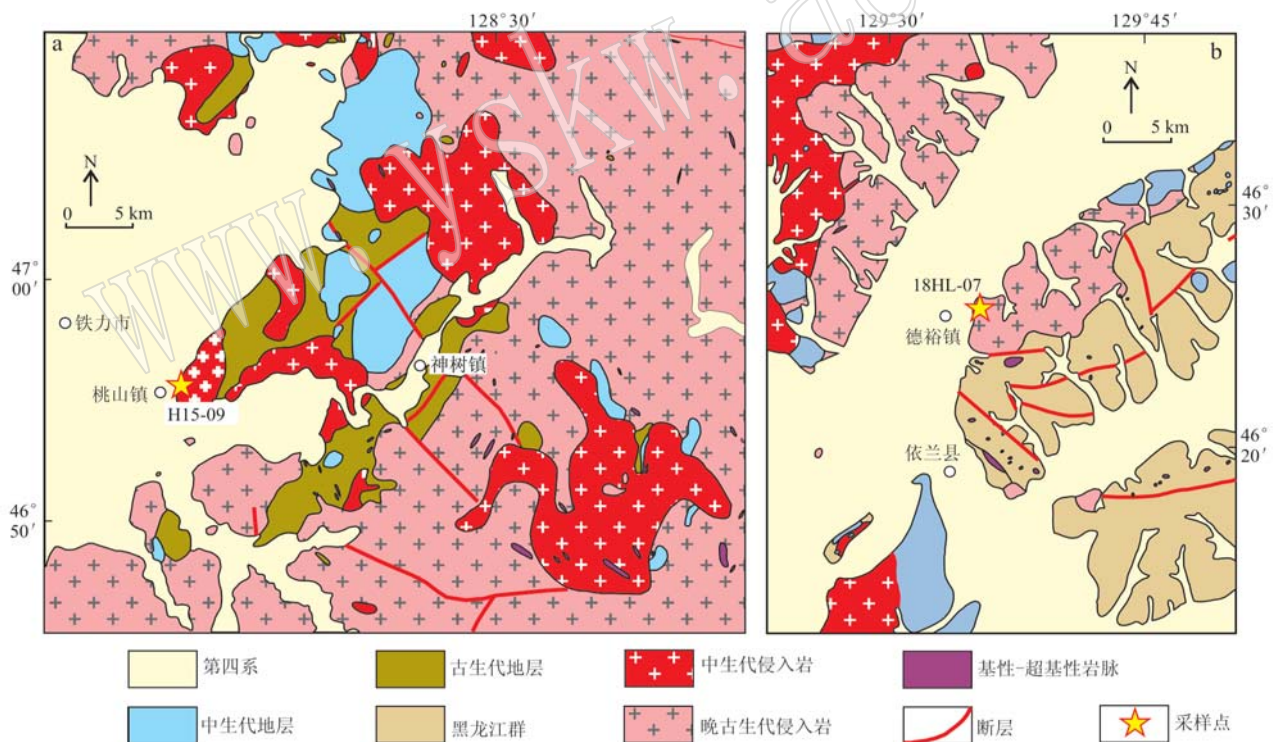


图 2 铁力地区[a, 据黑龙江省地质局区域地质测量队(1970)^①]和依兰地区[b, 据黑龙江省地质局区域地质测量第五分队(1972)^②]地质图和采样位置

Fig. 2 Detailed geological maps with the sampling localities in the Tieli [a, after Heilongjiang Geological Bureau Regional Geological Survey Team (1970)^①] and Yilan [b, after the 5th Detachment of Regional Geological Survey, Heilongjiang Geological Bureau (1972)^②] areas

图中样品号所代表的是出露岩体编号, 如 H15-09, 如果一个露头所采样品数量多于一个, 具体每个样品将额外编号为 H15-09-1 和 H15-09-2

The sample number in the map, such as H15-09, is a location number, in the case of more than one sample from a given location, the samples are given extra numbers, such as H15-09-1 and H15-09-2

① 黑龙江省地质局区域地质测量队, 1970. 1:20 万区域地质调查报告铁力县幅。

② 黑龙江省地质局区域地质测量第五分队, 1972. 1:20 万区域地质调查报告依兰县幅。

的德裕镇岩体(图 2b), 采样点坐标为 $N46^{\circ}25'35''$, $E129^{\circ}34'55''$, 在 1:20 万地质图上属于古元古代花岗岩。该岩体呈椭球状侵入到二叠纪地层中, 出露面积约 16 km^2 , 岩性有正长花岗岩和二长花岗岩等, 主体为一套中细粒二长花岗岩。野外观察发现, 所采的二长花岗岩具中细粒粒状结构, 块状构造,

节理比较发育, 后期被灰绿色的基性岩脉侵入(图 3c)。镜下观察显示, 二长花岗岩主要矿物组成为石英($\sim 25\%$)、钾长石($\sim 30\%$)、斜长石($\sim 35\%$)、黑云母($\sim 7\%$)以及少量的锆石、榍石、磁铁矿和磷灰石等副矿物($< 3\%$)(图 3d)。

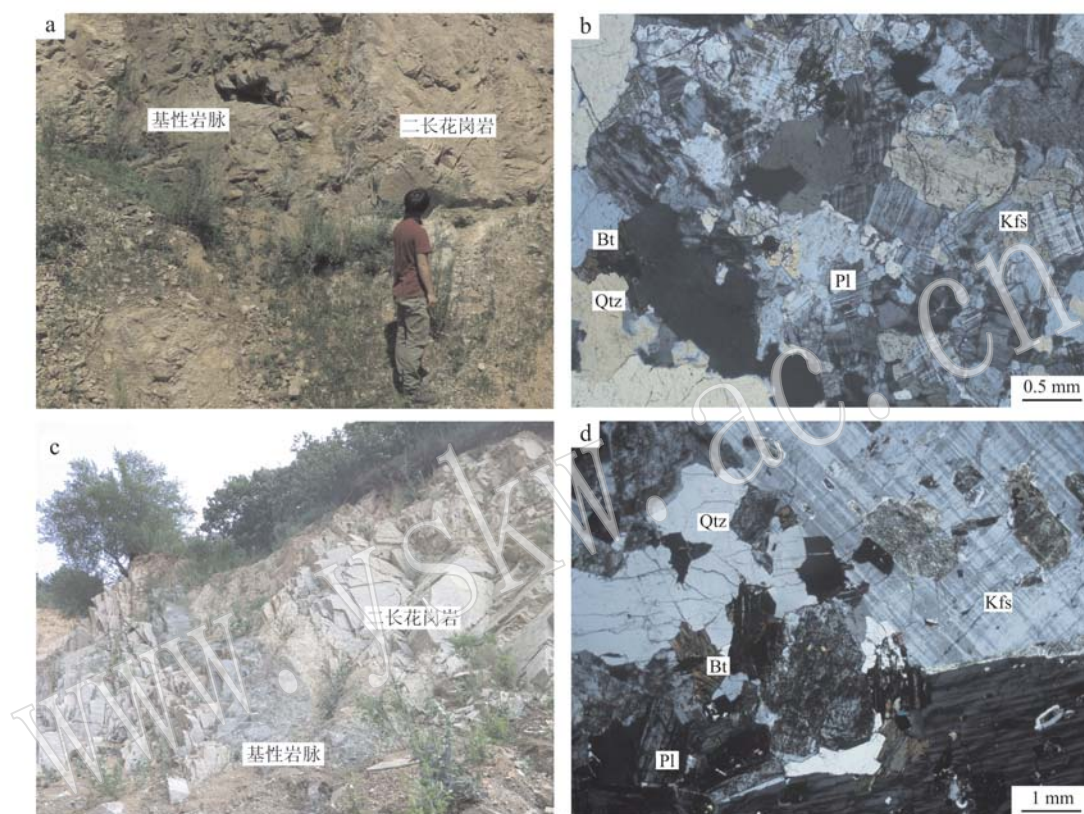


图 3 铁力和依兰地区花岗岩野外和镜下显微特征(矿物缩写符号据沈其韩, 2009)

Fig. 3 Field photographs and photomicrographs of the monzogranite intrusions from Xiao Hingan Mountains-Zhangguangcai Mountains showing field relationships and textures (mineral abbreviation after Shen Qihan, 2009)

a—铁力地区二长花岗岩被基性岩脉侵入; b—二长花岗岩(H15-09-1)主要组成矿物(+); c—依兰地区二长花岗岩节理比较发育;

d—二长花岗岩(18HL-07-1)主要组成矿物(+); Bt—黑云母; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Qtz—石英

a—the monzogranite pluton intruded by the basic vein in the Tieli area; b—the mineral assemblage of the monzogranite (H15-09-1) (+); c—the monzogranite pluton with well developed joints in the Yilan area; d—the mineral assemblage of the monzogranite (18HL-07-1) (+); Bt—biotite;

Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Qtz—quartz

2 实验方法

2.1 锆石 U-Pb 定年

锆石单矿物分选在河北廊坊诚信地质服务有限公司完成。将待测年样品进行粉碎、淘洗, 采用常规重选和磁选方法进行锆石分选, 再在双目镜下手工挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒, 将其整齐地粘在双面胶上, 用无色透明的环氧树脂灌注成激

光样品靶, 待固结后对其进行抛磨至锆石的核部出露。随后采集锆石的透射光、反射光以及阴极发光(CL)图像进行分析, 查明锆石内部结构, 选择有代表性的锆石颗粒进行测试。

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分别在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室和中国地质科学院地质研究所矿物/包裹体微区分析实验室完成。在北京大学测试过程中(样品 H15-09-1), 选用的仪器为电感耦合等离子体质谱仪 Agilent 7500ce 及配

套的 COMPEXPRO 102 准分子激光剥蚀系统。激光剥蚀束斑直径为 32 μm ，剥蚀频率为 5 Hz，能量密度为 6 J/cm^2 。分析过程中，每 5 个待测样品插入一组标准锆石样品。数据处理采用软件 GLITTER 4.4 (Van *et al.*, 2001) 完成，选择标准锆石 Plešovice (~337 Ma) 作为外标进行同位素校正，标准锆石 91500 (~1 062 Ma) 作为监控盲样。元素含量计算时选择国际标样 NIST 610 为外标、 ^{29}Si 为内标元素进行校正。数据分析过程中，所有样品的普通铅校正采用 Anderson (2002) 的方法，锆石年龄谱和图以及加权平均值的计算选用 ISOPLOT 3.0 程序 (Ludwig, 2003)。详细的实验步骤和数据处理过程参照文献 Yuan 等 (2004)。

在中国地质科学院地质研究所测试过程中 (样品 18HL-07-1)，选用的质谱仪为 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪，配有 NWR193^{UC} 型 193 nm 深紫外激光剥蚀进样系统，激光剥蚀束斑直径为 30 μm ，频率为 5 Hz，能量密度为 2 J/cm^2 。分析过程中，锆石 GJ-1 (~610 Ma) 和 91500 (~1 062 Ma) 作为标样，每隔 5 个样品点分析 2 次标样。测试完成后，使用 Iolite 程序对数据进行处理。详细的实验流程参照于超等 (2019)。

2.2 锆石原位 Lu-Hf 同位素分析

锆石原位 Lu-Hf 同位素测试在中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室完成，所用仪器为 Neptune Plus 多接收等离子体质谱仪和型号为 COMPEXPRO 193 nm 紫外激光剥蚀系统 (LA-MC-ICP-MS)。实验过程中，激光束斑直径设置为 32 μm ，激光脉冲频率为 8 Hz，剥蚀出的气溶胶通过载气 He 运入质谱仪进行同位素比值的精确测定。锆石标样 91500 作为参考标准，在本次测试中，其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值均在 0.282 295 \pm 0.000 020 (2σ) 范围内，与 Wu 等 (2006) 所报道的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值在误差范围内完全一致。具体实验原理及详细分析流程参照 Wu 等 (2006) 和侯可军等 (2007)。

2.3 全岩主量和微量元素测定

全岩主量元素分析在中科院地质与地球物理研究所岩矿制样与分析实验室、武汉上谱分析科技有限责任公司完成，微量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室、武汉上谱分析科技有限责任公司完成。

在中科院地质与地球物理研究所测试全岩主量元素过程中，采用的分析方法为 X 射线荧光熔片法

(XRF)，测试仪器为顺序式 X 射线荧光光谱仪 (AX-10S Minerals)。制备样品时，先称量 0.600 0 g 待测样品放入已烧至恒重的小瓷坩埚中，然后将其置于预先加热到 ~1 000 $^{\circ}\text{C}$ 的高温炉内灼烧 60 min，取出坩埚冷却至室温后，称重，计算样品的烧失量 (LOI)。然后将测定后的样品粉末与 6.000 0 g 已烘干的 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 溶剂在玛瑙乳钵中研磨均匀后，转入 Pt-Au 坩埚中，滴入 NH_4Br 溶液 (120 mg/mL) 5 滴，并置于 M-4 燃气自动熔样机上加热至 ~1 060 $^{\circ}\text{C}$ 。熔融样品过程中，通过使坩埚不断旋转从而使样品充分熔融并混合均匀，约 10 min 后熔体被自动倒入模具中冷却，制成表面平整的圆饼 (直径 34 mm) 以便测试。实验中通过重复测样 (1/10) 和测量国际标样 (BCR-1 和 BCR-3) 来进行监控，元素测量精度一般优于 1%。

在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室测试微量元素过程中，采用的测试仪器为电感耦合等离子体质谱仪 Agilent 7500ce。制备样品时，称量烘干后的岩石粉末 25 mg 倒入 Teflon 溶样罐中，加入 1.5 mL 浓 HNO_3 和 1.5 mL 浓 HF 溶液，在电热板上 50 $^{\circ}\text{C}$ 恒温过夜；第 2 天将电热板加热到 150 $^{\circ}\text{C}$ ，直至溶液蒸干，再加入 1.5 mL HF、1.5 mL HNO_3 和 3 滴 HClO_4 ，加盖置于高压罐内，放入烘箱内，在恒温 175 $^{\circ}\text{C}$ 条件下溶解 60 h 以上；然后将 Teflon 溶样罐取出，在 150 $^{\circ}\text{C}$ 条件下蒸干溶液呈湿盐状，再重新加入 3 mL HNO_3 ，加盖放入高压罐内，在烘箱 150 $^{\circ}\text{C}$ 恒温下溶解 10 h 以上；最后再将样品蒸干，用 1% 的 HNO_3 稀释到 50 mL，充分摇匀以备测量。实验中测量国际标样 GSR-1 (花岗岩)、GSR-3 (玄武岩)、GSR-10 (辉长岩)、DZΣ-1 (超基性岩) 和空白样品来监控数据质量，通常元素测量精度优于 5%，Nb 和 Ta 优于 10%。

3 实验结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

样品 H15-09-1 和 18HL-07-1 中挑选出的锆石多数晶形较完整，在显微镜下主要为无色半透明-透明的短柱状、长柱状晶体，锆石颗粒长轴多在 60 ~ 200 μm 之间，长宽比介于 1:1 ~ 3:1 之间。CL 图像显示多数锆石具有明显的岩浆振荡环带 (图 4a、4c)，少数具有核-边结构，核部为明显的继承锆石，边部发育不同程度的振荡环带，并且所选测年的锆

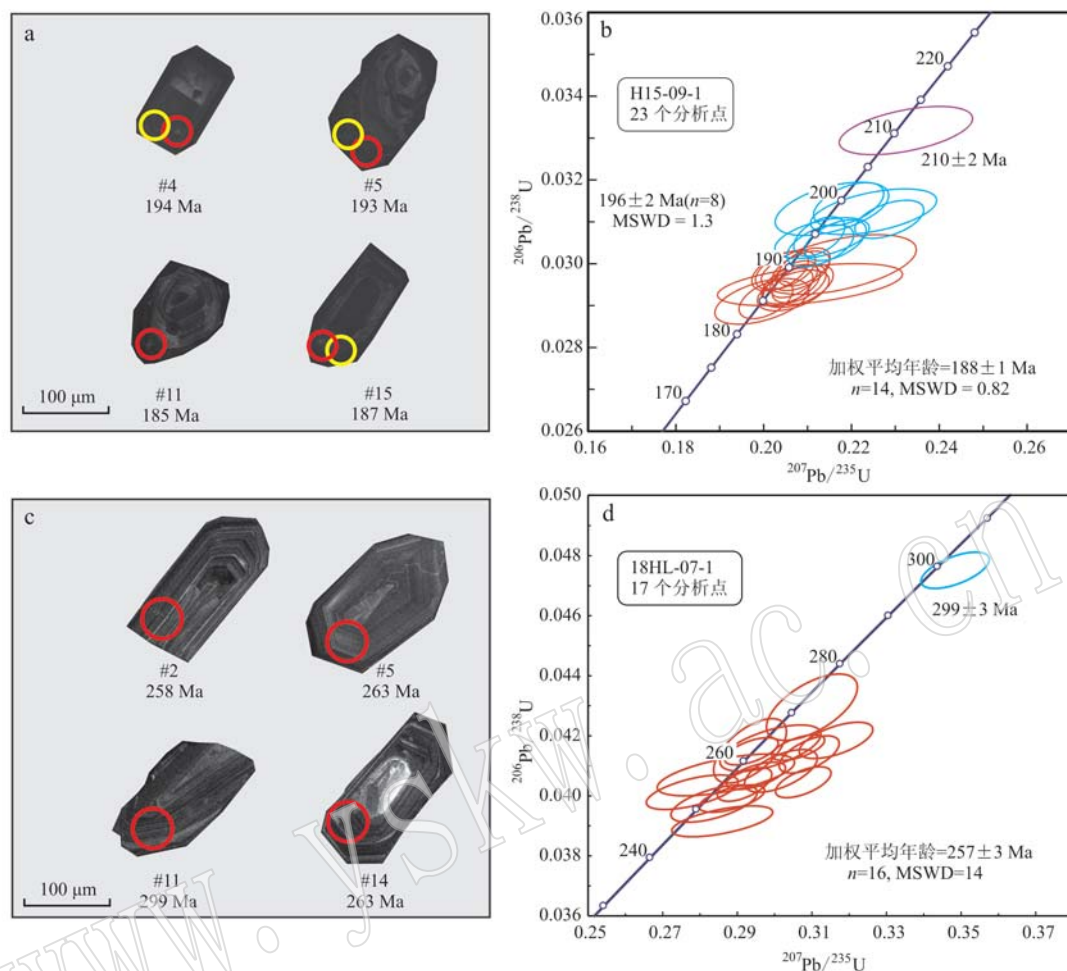


图4 二长花岗岩锆石 CL 图(a、c)和 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图(b、d)(红色圆圈为 U-Pb 定年位置, 黄色圆圈为 Lu-Hf 同位素分析位置)

Fig. 4 Representative cathodoluminescence (CL) images (a, c) and LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams (b, d) of zircons from the monzogranites (the red and yellow circles represent spots for U-Pb and Lu-Hf analysis, respectively)

石都具有较高的 Th/U (0.08 ~ 0.83) 值, 说明其为岩浆成因锆石 (Rubatto, 2002; 吴元保等, 2004)。

样品 H15-09-1 中选取 26 颗锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 测试, 剔除谐和性较差的点后, 剩下 23 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 210 ~ 185 Ma 之间 (表 1、图 4b)。其中, 最年轻的一组岩浆锆石谐和年龄为 190 ~ 185 Ma, 加权平均值为 188 ± 1 Ma ($n=14$, $\text{MSWD}=0.82$), 代表该花岗岩的结晶年龄。而相对较老的谐和年龄应代表岩浆上升过程中所捕获的锆石年龄, 分别为 196 ± 2 Ma ($n=8$, $\text{MSWD}=1.3$) 和 210 ± 2 Ma。

样品 18HL-07-1 中选取 25 颗锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 测试, 剔除谐和性较差的点后, 剩下 17 个分析点均落在谐和线上或谐和线附近 (表 1、图

4d)。其中, 年龄较集中且年轻的 16 粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 271 ~ 248 Ma, 加权平均值为 257 ± 3 Ma ($\text{MSWD}=14$), 代表了花岗岩的结晶年龄。另外 1 粒锆石年龄较老, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 299 ± 3 Ma, 可能为岩浆侵位过程中所捕获的围岩锆石。

3.2 Hf 同位素特征

选取铁力地区的二长花岗岩样品 H15-09-1 中 10 粒具有谐和年龄的典型锆石进行了 Hf 同位素分析, 锆石的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 及地壳模式年龄 (t_{DM}^{C}) 分别以 $t=188$ Ma 和 196 Ma 计算, 具体分析结果见图 5 和表 2。代表二长花岗岩结晶年龄 (188 Ma) 的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 708 ~ 0.282 777, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 +1.7 ~ +4.1, 二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM}^{C}) 为 1 121 ~

表 1 小兴安岭-张广才岭地区二长花岗岩 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果
 Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results for the monzogranites from Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains

点号	$m_{Pb}/10^{-6}$		Th/U	同位素比值										同位素年龄/Ma		Disc/ %				
	Th	U		$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{208}Pb/^{232}Th$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{208}Pb/^{232}Th$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{208}Pb/^{232}Th$	1 σ	2 σ					
H15-09-1-01	318	870	0.36	0.049 9	0.001 1	0.200 5	0.004 0	0.029 1	0.000 3	0.009 0	0.000 3	190	28	186	3	185	2	181	5	1
H15-09-1-02	528	852	0.62	0.050 7	0.001 1	0.208 5	0.004 4	0.029 8	0.000 3	0.009 3	0.000 2	226	29	192	4	189	2	187	5	1
H15-09-1-03	1 336	1 799	0.74	0.050 3	0.001 0	0.212 7	0.003 8	0.030 7	0.000 3	0.010 1	0.000 2	210	24	196	3	195	2	203	4	2
H15-09-1-04	330	760	0.43	0.051 3	0.001 2	0.216 4	0.004 6	0.030 6	0.000 3	0.009 8	0.000 3	256	30	199	4	194	2	197	5	1
H15-09-1-05	207	496	0.42	0.050 7	0.001 3	0.212 9	0.005 0	0.030 4	0.000 3	0.010 2	0.000 3	229	35	196	4	193	2	206	6	0
H15-09-1-07	82	214	0.83	0.052 5	0.002 9	0.217 1	0.011 7	0.030 0	0.000 5	0.009 3	0.000 7	308	94	200	10	190	3	187	14	2
H15-09-1-08	959	1 156	0.38	0.050 6	0.001 0	0.205 6	0.003 7	0.029 4	0.000 2	0.009 4	0.000 2	224	24	190	3	187	2	190	4	1
H15-09-1-09	255	700	0.36	0.049 8	0.001 2	0.205 0	0.004 5	0.029 9	0.000 3	0.009 4	0.000 3	185	32	189	4	190	2	190	6	0
H15-09-1-10	190	377	0.50	0.051 1	0.001 4	0.206 8	0.005 4	0.029 4	0.000 3	0.009 3	0.000 3	244	40	191	5	187	2	187	6	1
H15-09-1-11	138	298	0.46	0.049 8	0.001 8	0.199 6	0.007 1	0.029 1	0.000 4	0.009 2	0.000 4	183	59	185	6	185	2	184	8	1
H15-09-1-12	766	1 439	0.53	0.050 7	0.001 0	0.209 2	0.003 9	0.029 9	0.000 3	0.009 9	0.000 2	227	25	193	3	190	2	198	5	3
H15-09-1-13	373	964	0.39	0.050 8	0.002 3	0.232 4	0.010 0	0.033 2	0.000 4	0.010 5	0.000 1	232	105	212	8	210	2	210	2	0
H15-09-1-14	407	874	0.47	0.050 7	0.001 1	0.206 2	0.004 4	0.029 5	0.000 3	0.009 2	0.000 3	226	30	190	4	187	2	186	5	1
H15-09-1-15	503	786	0.64	0.051 1	0.001 4	0.207 7	0.005 4	0.029 5	0.000 3	0.008 7	0.000 3	246	38	192	5	187	2	175	5	1
H15-09-1-16	100	272	0.37	0.049 9	0.002 0	0.215 6	0.008 5	0.031 3	0.000 4	0.010 4	0.000 5	192	67	198	7	199	3	208	11	1
H15-09-1-17	319	586	0.54	0.050 6	0.001 3	0.219 4	0.005 3	0.031 4	0.000 3	0.010 2	0.000 3	224	36	201	4	199	2	206	6	1
H15-09-1-18	1 032	4 479	0.23	0.053 4	0.001 3	0.228 6	0.005 2	0.031 1	0.000 3	0.009 7	0.000 1	345	57	209	4	197	2	196	2	2
H15-09-1-19	292	1 003	0.29	0.050 5	0.001 8	0.213 3	0.007 1	0.030 6	0.000 3	0.009 7	0.000 1	220	83	196	6	194	2	194	2	1
H15-09-1-20	862	1 740	0.50	0.051 8	0.003 5	0.210 6	0.013 9	0.029 5	0.000 3	0.009 3	0.000 1	275	155	194	12	187	2	187	3	2
H15-09-1-21	351	725	0.48	0.051 1	0.001 1	0.208 1	0.004 1	0.029 5	0.000 3	0.009 3	0.000 2	247	27	192	3	188	2	187	5	-1
H15-09-1-22	457	926	0.49	0.049 6	0.001 1	0.203 8	0.004 3	0.029 8	0.000 3	0.009 3	0.000 3	174	30	188	4	189	2	187	5	1
H15-09-1-23	790	1 345	0.59	0.050 6	0.000 9	0.206 9	0.003 6	0.029 6	0.000 3	0.009 6	0.000 2	224	22	191	3	188	2	192	4	4
H15-09-1-26	80	335	0.24	0.052 3	0.002 3	0.225 1	0.009 5	0.031 2	0.000 4	0.009 8	0.000 1	296	102	206	8	198	2	197	2	3
H18-07-1-02	309	1 283	0.24	0.053 3	0.001 4	0.301 7	0.008 0	0.040 8	0.000 4	0.013 1	0.000 4	319	58	267	6	258	4	264	7	4
H18-07-1-04	114	1 494	0.08	0.052 4	0.001 6	0.310 0	0.010 0	0.043 0	0.000 9	0.014 8	0.001 0	291	68	275	8	271	6	296	19	1
H18-07-1-05	125	508	0.25	0.052 0	0.001 9	0.299 0	0.011 0	0.041 6	0.000 6	0.013 1	0.000 5	243	75	264	8	263	4	264	10	1
H18-07-1-08	442	1 879	0.24	0.054 2	0.001 1	0.309 3	0.006 5	0.041 4	0.000 5	0.014 9	0.000 4	358	47	273	5	261	3	299	8	5
H18-07-1-10	304	1 316	0.23	0.054 3	0.001 5	0.316 5	0.008 1	0.041 9	0.000 5	0.014 2	0.000 4	368	61	279	6	264	3	284	8	6
H18-07-1-11	215	1 241	0.17	0.053 2	0.001 1	0.348 4	0.007 5	0.047 5	0.000 5	0.015 5	0.000 4	317	46	304	6	299	3	311	8	1
H18-07-1-12	325	1 746	0.19	0.051 2	0.001 0	0.293 8	0.005 8	0.041 5	0.000 4	0.013 1	0.000 3	231	42	261	5	262	2	264	7	0
H18-07-1-13	186	430	0.43	0.052 2	0.001 8	0.283 8	0.009 5	0.039 7	0.000 5	0.012 4	0.000 4	251	75	253	8	251	3	249	8	1
H18-07-1-14	558	2 264	0.25	0.053 1	0.001 0	0.306 3	0.005 8	0.041 6	0.000 4	0.013 5	0.000 3	326	40	271	5	272	5	272	5	3
H18-07-1-15	333	1 622	0.21	0.050 0	0.001 0	0.307 7	0.006 1	0.040 5	0.000 4	0.013 0	0.000 3	391	42	272	5	256	3	262	6	6
H18-07-1-16	103	426	0.24	0.049 8	0.001 8	0.278 0	0.010 0	0.040 1	0.000 5	0.012 3	0.000 6	169	76	248	8	254	3	246	12	-2
H18-07-1-18	111	421	0.26	0.052 9	0.002 0	0.286 0	0.011 0	0.039 2	0.000 4	0.011 9	0.000 5	278	83	254	8	248	3	240	11	3
H18-07-1-19	92	256	0.36	0.050 9	0.002 7	0.287 0	0.015 0	0.040 7	0.000 6	0.013 1	0.000 7	200	110	254	12	257	4	262	13	-1
H18-07-1-22	267	1 112	0.24	0.052 3	0.001 3	0.288 6	0.007 2	0.039 9	0.000 4	0.012 2	0.000 3	273	53	257	6	252	2	246	6	2
H18-07-1-23	303	1 719	0.18	0.052 4	0.001 2	0.295 0	0.006 5	0.040 7	0.000 4	0.013 1	0.000 4	280	49	262	5	257	2	263	8	2
H18-07-1-24	266	1 890	0.14	0.050 8	0.001 6	0.293 5	0.008 0	0.041 5	0.000 9	0.012 2	0.000 6	235	65	261	6	262	5	244	12	0
H18-07-1-25	439	2 812	0.16	0.052 1	0.001 1	0.292 0	0.006 0	0.040 4	0.000 5	0.013 0	0.000 3	275	47	260	5	255	3	261	7	2

注: Disc(%) = 100% × [($^{207}Pb/^{235}U$ 年龄) / ($^{206}Pb/^{238}U$ 年龄) - 1]。

表 2 小兴安岭-张广才岭地区二长花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果
 Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic compositions for the monzogranite from Xiao Hingan Mountains-Zhangguangcai Mountains

测点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon\text{Hf}(0)$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM}/Ma	f_{lawHf}	$t_{\text{DM}}^C/\text{Ma}$
H15-09-1-01	188	0.055 125	0.000 882	0.001 474	0.000 028	0.282 736	0.000 024	0.282 731	-1.3	2.7	741	-0.96	1 060
H15-09-1-07	188	0.034 533	0.000 499	0.000 944	0.000 018	0.282 708	0.000 024	0.282 704	-2.3	1.7	771	-0.97	1 121
H15-09-1-09	188	0.073 590	0.000 439	0.001 802	0.000 005	0.282 771	0.000 018	0.282 765	0.0	3.9	697	-0.95	984
H15-09-1-15	188	0.035 761	0.000 434	0.000 952	0.000 008	0.282 734	0.000 027	0.282 731	-1.3	2.7	734	-0.97	1 062
H15-09-1-22	188	0.072 405	0.000 673	0.001 775	0.000 021	0.282 777	0.000 017	0.282 770	0.2	4.1	689	-0.95	972
H15-09-1-03	196	0.169 183	0.001 885	0.004 194	0.000 048	0.282 788	0.000 030	0.282 773	0.6	4.3	720	-0.87	961
H15-09-1-04	196	0.051 437	0.000 882	0.001 342	0.000 018	0.282 787	0.000 019	0.282 783	0.5	4.7	665	-0.96	939
H15-09-1-05	196	0.035 070	0.000 433	0.000 924	0.000 007	0.282 754	0.000 022	0.282 751	-0.6	3.6	705	-0.97	1 011
H15-09-1-18	196	0.084 581	0.001 338	0.002 161	0.000 035	0.282 739	0.000 022	0.282 731	-1.2	2.9	750	-0.93	1 054
H15-09-1-19	196	0.046 375	0.000 363	0.001 182	0.000 003	0.282 760	0.000 019	0.282 755	-0.4	3.7	702	-0.96	1 001

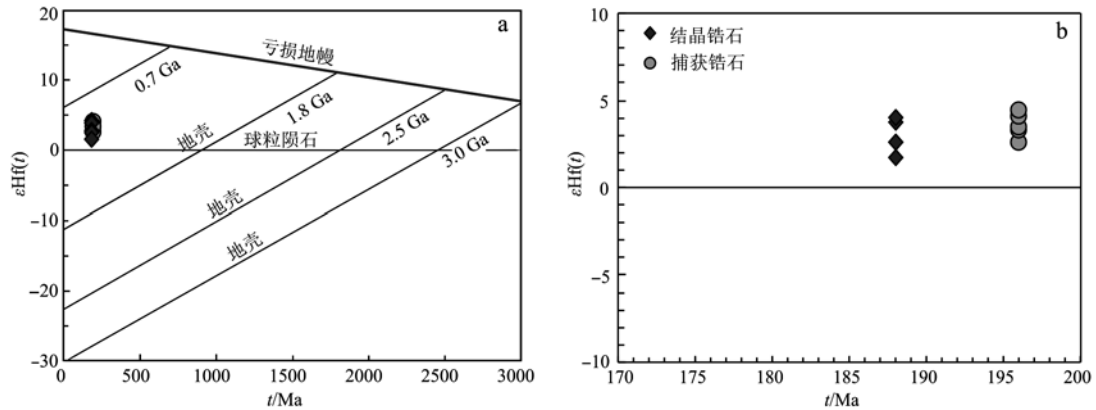


图5 二长花岗岩锆石 Hf 同位素特征(b为a的局部放大)

Fig. 5 Correlations between $\epsilon\text{Hf}(t)$ and ages of zircons from the monzogranite (b is local enlargement of a)

972 Ma。剩余5颗捕获锆石(196 Ma)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.282 739 ~ 0.282 788, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为+2.9 ~ +4.7, 二阶段 Hf 模式年龄为1 054 ~ 939 Ma。

3.3 岩石地球化学特征

共选取6个样品进行主量和微量元素测试, 分析结果列于表3。其中, 2个采自桃山镇岩体的二长花岗岩样品的 SiO_2 含量为74.24% ~ 75.95%, 全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量为5.72% ~ 8.94%, Al_2O_3 含量

续表3

Continued Table 3

表3 小兴安岭-张广才岭地区二长花岗岩主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果

Table 3 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) elements for the monzogranites from Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains

样品号	H15-09-2	H15-09-3	18HL-07-2	18HL-07-3	18HL-07-4	18HL-07-5
SiO_2	74.24	75.95	70.31	71.01	71.30	70.23
TiO_2	0.10	0.19	0.19	0.21	0.15	0.19
Al_2O_3	14.28	13.93	15.39	15.12	15.13	15.61
TFe_2O_3	1.34	1.61	1.57	1.72	1.43	1.59
MnO	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
MgO	0.25	0.30	0.27	0.29	0.23	0.27
CaO	0.49	2.25	1.68	1.52	1.32	1.70
Na_2O	3.96	4.77	4.11	4.08	4.23	4.13
K_2O	4.98	0.95	4.79	4.29	4.77	4.77
P_2O_5	0.01	0.02	0.04	0.05	0.04	0.04
LOI	0.90	0.62	0.92	0.92	0.79	0.77
TOTAL	100.58	100.62	99.31	99.22	99.42	99.33
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	8.94	5.72	8.90	8.36	9.00	8.90
A/CNK	1.12	1.07	1.03	1.07	1.04	1.04
Li	21.30	30.60	18.00	16.30	15.10	18.20
Be	2.66	3.41	2.21	2.49	2.53	2.30
Sc	5.96	0.58	1.18	1.50	1.26	1.28

样品号	H15-09-2	H15-09-3	18HL-07-2	18HL-07-3	18HL-07-4	18HL-07-5
V	—	—	3.66	4.52	3.29	3.76
Cr	11.30	—	0.46	0.69	0.39	0.56
Co	1.15	1.29	0.92	0.87	0.67	0.95
Ni	10.90	0.00	1.03	1.00	0.89	1.03
Cu	2.71	0.71	0.62	0.77	0.81	0.57
Zn	79.20	40.00	46.40	42.40	47.90	46.70
Ga	19.60	15.60	19.10	19.40	19.40	19.90
Rb	150	50	141	130	147	140
Sr	32	329	511	505	408	531
Y	39.60	9.56	9.22	9.31	9.57	8.03
Zr	196	208	168	177	138	165
Nb	16.80	6.70	6.46	6.97	7.54	6.15
Ba	264	186	1 433	1 382	1 063	1 488
La	36.10	25.50	27.00	27.70	17.40	27.40
Ce	77.10	60.00	48.10	49.70	33.10	48.70
Pr	9.51	5.35	5.14	5.28	3.46	5.19
Nd	36.60	18.20	17.50	18.10	12.30	17.30
Sm	7.73	2.71	2.79	2.79	2.10	2.68
Eu	0.51	0.53	0.61	0.62	0.44	0.57
Gd	7.77	2.39	1.92	1.96	1.66	1.72
Tb	1.22	0.31	0.29	0.27	0.24	0.26
Dy	6.94	1.58	1.49	1.43	1.52	1.26
Ho	1.41	0.33	0.30	0.29	0.31	0.24
Er	3.92	1.00	0.89	0.90	1.03	0.80
Tm	0.59	0.17	0.13	0.16	0.16	0.13
Yb	3.72	1.18	0.99	1.04	1.18	0.86
Lu	0.56	0.19	0.17	0.17	0.18	0.17
Hf	6.72	6.88	4.28	4.42	3.67	4.03
Ta	0.84	0.62	0.44	0.42	0.50	0.37
Pb	22.20	12.10	27.70	25.60	31.30	27.80
Th	15.70	10.60	11.10	11.50	9.40	11.10
U	4.58	2.18	2.52	2.08	1.94	2.38
Sr/Y	0.81	34.40	55.46	54.30	42.61	66.16
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	6.97	15.50	19.57	19.07	10.53	22.75
Eu/Eu*	0.20	0.64	0.80	0.81	0.70	0.81
$t_{\text{Zr}}/^\circ\text{C}$	812	816	785	795	771	784

变化于 13.93% ~ 14.28% 之间, CaO 含量变化于 0.49% ~ 2.25% 之间, TFe_2O_3 含量介于 1.34% ~ 1.61% 之间, MgO 含量较低, 为 0.25% ~ 0.30%。在 TAS 分类图中, 样品都落入亚碱性系列范围内(图 6a; Irvine and Baragar, 1971), 分别属于高钾钙碱性系列和低钾拉斑系列(图 6b; Peccerillo and Taylor, 1976)。此外, 样品的 A/CNK 值变化于 1.07 ~ 1.12 之间, 为弱过铝质花岗岩(图 6c; Maniar and Piccoli, 1989)。

4 个采自德裕镇岩体的二长花岗岩样品的 SiO_2

含量为 70.23% ~ 71.30%, 全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量为 8.36% ~ 9.0%, Al_2O_3 含量变化于 15.12% ~ 15.61% 之间, CaO 含量变化于 1.32% ~ 1.70% 之间, TFe_2O_3 含量介于 1.43% ~ 1.72% 之间, MgO 含量较低, 为 0.23% ~ 0.29%。在 TAS 分类图中, 样品都落入亚碱性系列范围内(图 6a), 属于高钾钙碱性系列(图 6b)。此外, 样品的 A/CNK 值变化于 1.03 ~ 1.07 之间, 为弱过铝质花岗岩(图 6c)。

在球粒陨石标准化稀土元素配分图解上(图 7a; Sun and McDonough, 1989), 两个岩体的样品都表现

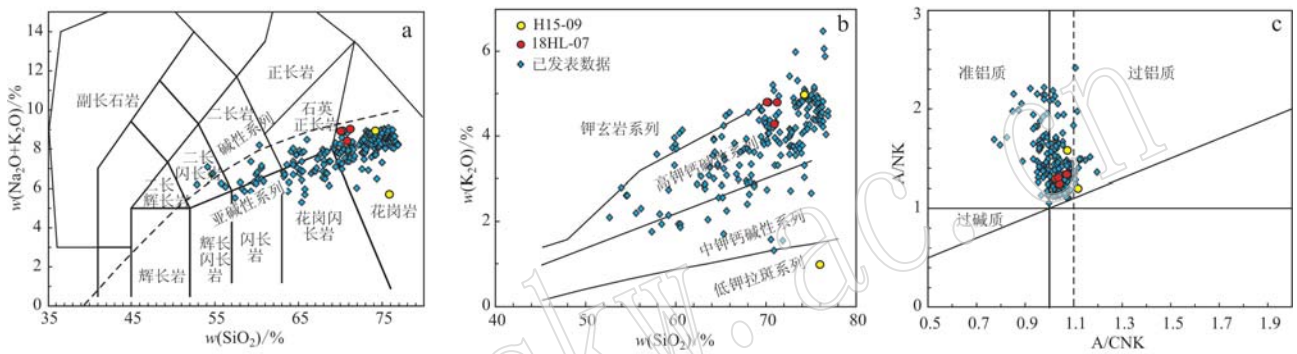


图 6 花岗岩地球化学分类图解

Fig. 6 Granite classification diagrams

a—TAS 图解(据 Irvine and Baragar, 1971); b— K_2O — SiO_2 图解(据 Peccerillo and Taylor, 1976); c—A/NK—A/CNK 图解(据 Maniar and Piccoli, 1989); 数据来源: 魏红艳等, 2012; Yu *et al.*, 2013; 包真艳等, 2014; Dong *et al.*, 2017; Ge *et al.*, 2017, 2018; Yang *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2018

a—TAS diagram (after Irvine and Baragar, 1971); b— K_2O versus SiO_2 diagram (after Peccerillo and Taylor, 1976); c—A/NK versus A/CNK diagram (after Maniar and Piccoli, 1989); data sources: Wei Hongyan *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2013; Bao Zhenyan *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2017; Ge *et al.*, 2017, 2018; Yang *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2018

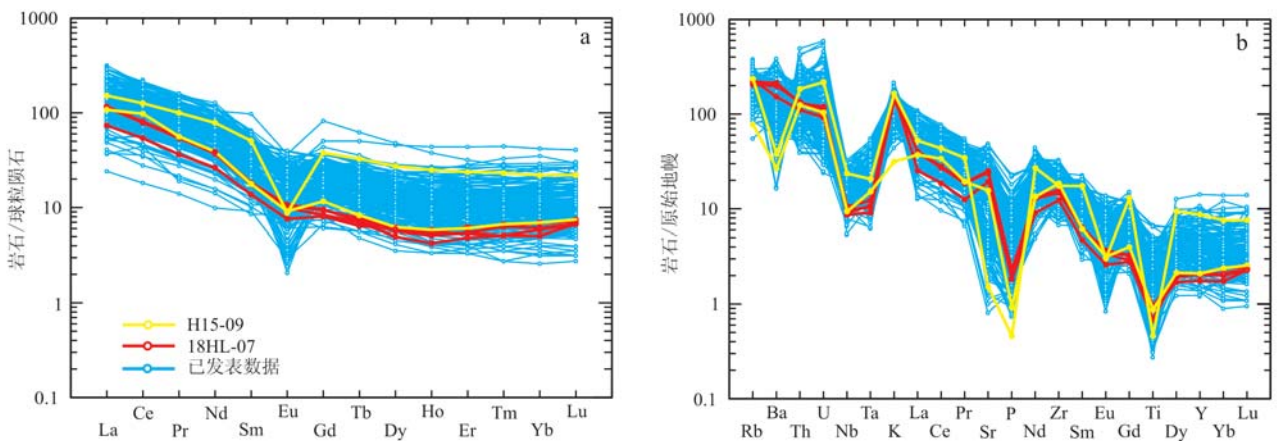


图 7 花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element patterns (b) for the granites in Xiaohinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains

球粒陨石标准化和原始地幔标准化数值据 Sun and McDonough(1989), 数据来源: 魏红艳等, 2012; Yu *et al.*, 2013; 包真艳等, 2014; Guo *et al.*, 2016; Dong *et al.*, 2017; Ge *et al.*, 2017, 2018; Yang *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2018

Chondrite and primitive mantle values after Sun and McDonough (1989); data sources: Wei Hongyan *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2013; Bao Zhenyan *et al.*, 2014; Guo *et al.*, 2016; Dong *et al.*, 2017; Ge *et al.*, 2017, 2018; Yang *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2018

为轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型曲线 [$(La/Yb)_N = 6.97 \sim 22.75$], Eu 具有明显的负异常 ($Eu^*/Eu = 0.20 \sim 0.81$)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 7b; Sun and McDonough, 1989), 样品均表现出富集大离子亲石元素(如 Rb、Th、K 和 Sr 等)、亏损高场强元素(如 Nb、Ta 和 Ti 等)的地球化学特征。

4 讨论

4.1 研究区晚古生代至中生代花岗岩时空分布

前人根据小兴安岭-张广才岭地区出露的岩浆岩之间的野外接触关系、岩石组合和区域地层对比、Rb-Sr 年代学等方法的研究, 提出该地区存在一条巨型的南北向古生代岩浆岩带(图 1b; 黑龙江省地质矿产局, 1993)。然而早期对该带内的岩体形成时代的定年并不十分可靠, 尤其是经历了后期构造-岩浆事件的改造, Rb-Sr 体系遭到破坏, 因此, 用上述方法获得的结果来限定岩浆结晶年龄存在质疑(Wang *et al.*, 2016)。近年来, 一些研究者对小兴安岭-张广才岭地区的岩体进行大量的锆石 U-Pb 定年, 将以往被认为是早古生代的岩体更正为晚古生代和中生代(Wu *et al.*, 2000, 2011; Meng *et al.*,

2011; 魏红艳等, 2012; Yang *et al.*, 2017)。

本文二长花岗岩样品的锆石发育典型的岩浆振荡环带结构(图 4a、4c), 并且其 Th/U 值较高(0.08 ~ 0.83), 具有岩浆成因锆石的特点(Rubatto, 2002; 吴元保等, 2004)。在锆石 U-Pb 年龄谱和图中(图 4b、4d), 两个岩体的结晶年龄分别为 188 ± 1 Ma 和 257 ± 3 Ma, 代表二长花岗岩的形成时代, 表明小兴安岭-张广才岭地区在晚二叠世和早侏罗世期间至少存在两期岩浆事件。

为了进一步探索小兴安岭-张广才岭地区岩浆岩的时空分布规律, 本文归纳总结了该地区晚古生代至中生代期间已报道的 126 个花岗岩的锆石 U-Pb 年龄数据(表 4), 然后按照经度进行年龄投图(经度区间为 $E124^\circ \sim E131^\circ$)。锆石 U-Pb 年龄分布图显示(图 8), 小兴安岭-张广才岭地区晚古生代至中生代的花岗岩具有自东向西形成时代逐渐变年轻的趋势。为了消除郯庐断裂带北支——佳木斯-依兰断裂走滑位移所造成的影响, 本文又将佳木斯-依兰断裂两侧的岩体进行区分, 分别按照经度进行年龄投图(图 8), 这一年龄分布规律得到进一步证实。因此, 本文提出, 小兴安岭-张广才岭地区晚古生代至中生代的花岗质岩石形成时代具有由东向西逐渐变年轻的时空分布特征。

表 4 小兴安岭-张广才岭地区晚古生代至中生代花岗岩质岩石锆石 U-Pb 年龄统计

Table 4 The published zircon U-Pb ages for the late Paleozoic to Mesozoic granitoids from Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains

序号	样品号	分布地区	GPS		岩性	测试方法	年龄/Ma	数据来源
			纬度	经度				
郯庐断裂带北侧								
1	Q2-1	松辽盆地	43°46'44"N	124°34'31"E	花岗岩	LA-ICPMS	161 ± 5	Gao <i>et al.</i> , 2007
2	SN121	松辽盆地	43°47'19"N	124°36'58"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	165 ± 2	Gao <i>et al.</i> , 2007
3	SN122	松辽盆地	43°48'18"N	124°37'08"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	181 ± 3	Gao <i>et al.</i> , 2007
4	SN72	松辽盆地	43°48'18"N	124°37'08"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	161 ± 4	Gao <i>et al.</i> , 2007
5	Ershen-1	松辽盆地	45°35'48"N	125°16'11"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	165 ± 3	Wu <i>et al.</i> , 2001
6	DY103-2	亮甲山	44°26'01"N	126°46'30"E	碱长花岗岩	LA-ICPMS	191 ± 2	Wu <i>et al.</i> , 2011
7	DY104-2	舒兰	44°20'18"N	126°53'13"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	190 ± 2	Wu <i>et al.</i> , 2011
8	H15-61-5	玉泉	45°23'27"N	127°13'42"E	二长闪长岩	LA-ICPMS	179 ± 3	Ge <i>et al.</i> , 2017
9	HSW2-6	幸福林场	48°42'51"N	127°15'43"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	176 ± 1	徐美君等, 2013
10	HSW2-3	风水沟群	49°43'07"N	127°20'23"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	175 ± 1	徐美君等, 2013
11	HSW6-12	幸福林场	48°41'55"N	127°25'15"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	185 ± 2	徐美君等, 2013
12	HSW6-4	幸福林场	48°41'55"N	127°25'15"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	183 ± 2	徐美君等, 2013
13	H15-63-4	帽儿山	45°17'03"N	127°29'59"E	二长闪长岩	LA-ICPMS	181 ± 1	Ge <i>et al.</i> , 2017
14	H15-66-1	纪店屯	45°23'19"N	127°41'12"E	二长闪长岩	LA-ICPMS	180 ± 1	Ge <i>et al.</i> , 2017
15	DY0556-1	纪家店	45°23'03"N	127°41'45"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	190 ± 1	Wu <i>et al.</i> , 2011
16	97SW001	乌吉密	45°12'14"N	127°48'13"E	正长花岗岩	SHRIMP	180 ± 3	Wu <i>et al.</i> , 2011
17	H15-68-1	一曼村	45°19'27"N	127°50'31"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	174 ± 1	Ge <i>et al.</i> , 2017

续表 4-1
Continued Table 4-1

序号	样品号	分布地区	GPS		岩性	测试方法	年龄/Ma	数据来源
			纬度	经度				
18	97SW005	一面坡	46°05'05"N	128°07'32"E	花岗闪长岩	SHRIMP	183 ± 4	Wu <i>et al.</i> , 2011
19	H15-08-1	桃山镇	46°55'05"N	128°11'06"E	闪长岩	LA-ICPMS	181 ± 1	Ge <i>et al.</i> , 2018
20	H15-09-1	桃山镇	46°55'05"N	128°11'06"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	188 ± 1	本文
21	9777-1	石场	46°56'17"N	128°17'51"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	175 ± 2	Wu <i>et al.</i> , 2011
22	H15-11	神树镇	46°56'17"N	128°20'42"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	178 ± 2	Ge <i>et al.</i> , 2018
23	98SW101	延寿县	45°47'26"N	128°30'13"E	正长花岗岩	SHRIMP	199 ± 5	Wu <i>et al.</i> , 2011
24	97SW101	延寿县	45°47'26"N	128°30'13"E	正长花岗岩	SHRIMP	199 ± 5	Wu <i>et al.</i> , 2011
25	98SW103	延寿县	45°47'51"N	128°30'21"E	花岗闪长岩	SHRIMP	191 ± 4	Wu <i>et al.</i> , 2011
26	98SW122	延寿县	45°47'51"N	128°30'21"E	长英质岩脉	SHRIMP	147 ± 6	Wu <i>et al.</i> , 2011
27	98SW103	延寿县	45°47'51"N	128°30'21"E	花岗闪长岩	SHRIMP	191 ± 4	Wu <i>et al.</i> , 2011
28	98SW104	延寿县	45°47'51"N	128°30'21"E	长英质岩脉	SHRIMP	147 ± 6	Wu <i>et al.</i> , 2011
29	LM-0101	鹿鸣	47°22'08"N	128°31'54"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	181 ± 2	Hu <i>et al.</i> , 2014a
30	H15-14-1	神树镇东	46°57'51"N	128°42'17"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	191 ± 1	Ge <i>et al.</i> , 2018
31	9773-1	团结	46°43'00"N	128°47'14"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	201 ± 3	Wu <i>et al.</i> , 2011
32	9767-2	密林	46°31'05"N	128°49'51"E	正长花岗岩	TIMS	197 ± 2	Wu <i>et al.</i> , 2011
33	9766-1	朗乡	46°55'42"N	128°53'15"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	200 ± 2	Wu <i>et al.</i> , 2011
34	00SW225	红旗	47°41'50"N	128°58'00"E	花岗闪长岩	SHRIMP	198 ± 4	Wu <i>et al.</i> , 2011
35	9757-4	毛家屯	46°03'45"N	128°59'55"E	碱长花岗岩	TIMS	213 ± 2	Wu <i>et al.</i> , 2002
36	DY0385-1	朝鲜屯	47°38'48"N	129°02'55"E	碱长花岗岩	LA-ICPMS	176 ± 2	Wu <i>et al.</i> , 2011
37	H15-16-1	朗乡镇东南	47°02'49"N	129°06'19"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	195 ± 2	Ge <i>et al.</i> , 2018
38	P40-1	苔青	47°35'28"N	129°14'23"E	二长岩	LA-ICPMS	210 ± 2	Wu <i>et al.</i> , 2011
39	DY0380-1	小西林	47°27'22"N	129°14'40"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	200 ± 3	Wu <i>et al.</i> , 2011
40	1015-1	小西林	47°29'09"N	129°17'56"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	212 ± 2	魏红艳等, 2012
41	00SW231	大丰	47°24'15"N	129°24'36"E	二长花岗岩	SHRIMP	201 ± 4	Wu <i>et al.</i> , 2011
42	H15-34-1	铁西街	47°23'09"N	129°29'33"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	210 ± 1	Ge <i>et al.</i> , 2018
43	P31-4	丰茂林场	47°20'54"N	129°36'22"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	211 ± 1	魏红艳等, 2012
44	P24-4	丰茂林场	47°24'53"N	129°40'57"E	花岗斑岩	LA-ICPMS	210 ± 2	魏红艳等, 2012
45	1007-1	丰林林场	47°24'56"N	129°43'28"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	264 ± 1	魏红艳等, 2012
46	9780-2	清水村	48°16'28"N	129°47'03"E	碱长花岗岩	LA-ICPMS	222 ± 5	孙德有等, 2004
47	1009-1	白云林场	47°34'53"N	129°47'18"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	261 ± 1	魏红艳等, 2012
48	H15-37-1	五家子	47°24'31"N	129°47'34"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	251 ± 1	Ge <i>et al.</i> , 2018
49	P18-9	三道林场	47°24'31"N	129°49'10"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	260 ± 1	魏红艳等, 2012
50	1006-1	大砬子	47°23'58"N	129°54'22"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	262 ± 2	魏红艳等, 2012
51	H15-38-1	大砬子	47°23'58"N	129°54'25"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	242 ± 2	Ge <i>et al.</i> , 2018
52	PDS5-1	平顶山	48°23'34"N	129°05'36"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	273 ± 2	包真艳等, 2015
53	PDS7-1	平顶山	48°23'34"N	129°55'36"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	250 ± 3	包真艳等, 2015
54	H15-39-1	大砬子	47°23'00"N	129°58'57"E	闪长岩	LA-ICPMS	246 ± 1	Ge <i>et al.</i> , 2018
55	H15-40-1	大砬子	47°23'00"N	129°58'57"E	花岗岩	LA-ICPMS	241 ± 1	Ge <i>et al.</i> , 2018
56	P10-2	四号林场	47°22'51"N	129°59'27"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	244 ± 2	魏红艳等, 2012
57	1002-1	鹤林林场东	47°22'33"N	130°03'52"E	石英闪长岩	LA-ICPMS	260 ± 1	魏红艳等, 2012
58	P6-3	四号林场	47°22'04"N	130°04'00"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	261 ± 1	魏红艳等, 2012
59	S-990	俄罗斯远东			黑云正长花岗岩	ID-TIMS	218 ± 2	Sorokin <i>et al.</i> , 2010
60	S-951	俄罗斯远东			黑云正长花岗岩	ID-TIMS	185 ± 1	Sorokin <i>et al.</i> , 2010
61	S-1003	俄罗斯远东			黑云角闪花岗岩闪长岩	ID-TIMS	185 ± 1	Sorokin <i>et al.</i> , 2010
62	C-1129	俄罗斯远东			淡色花岗岩	ID-TIMS	209 ± 1	Sorokin <i>et al.</i> , 2016
63	C-1153	俄罗斯远东			淡色花岗岩	ID-TIMS	199 ± 4	Sorokin <i>et al.</i> , 2016
64	97SAW005	大湾折子			花岗闪长岩	SHRIMP	183 ± 4	Wu <i>et al.</i> , 2000
65	HJHN1	霍吉河			二长花岗岩	LA-ICPMS	186 ± 2	杨言辰等, 2012
67	LM1	鹿鸣			二长花岗岩	LA-ICPMS	183 ± 2	程国华等, 2015
68	LM-0101	鹿鸣			二长花岗岩	LA-ICPMS	181 ± 2	Hu <i>et al.</i> , 2014a
69	LM2	鹿鸣			二长花岗岩	LA-ICPMS	187 ± 2	程国华等, 2015
69	LMN	鹿鸣			二长花岗岩	LA-ICPMS	176 ± 2	杨言辰等, 2012
70	CLN	翠岭			石英二长岩	LA-ICPMS	178 ± 1	杨言辰等, 2012
71	XLJG-011	徐老九沟			二长花岗岩	LA-ICPMS	181 ± 1	Hu <i>et al.</i> , 2014a
72	XLJG-061	徐老九沟			二长花岗岩	LA-ICPMS	180 ± 1	Hu <i>et al.</i> , 2014a

续表 4-2
Continued Table 4-2

序号	样品号	分布地区	GPS		岩性	测试方法	年龄/Ma	数据来源
			纬度	经度				
73	X-4	新华屯			花岗闪长岩	SHRIMP	184 ± 4	Wu <i>et al.</i> , 2003a
74	Mz4	宝山			碱长花岗岩	LA-ICPMS	253 ± 3	高阳等, 2009
75	CHS-021	翠红山			正长花岗岩	LA-ICPMS	200 ± 2	Hu <i>et al.</i> , 2014b
76	CHY-2	翠红山			石英二长岩	LA-ICPMS	197 ± 3	Fei <i>et al.</i> , 2018
77	CHYX-2	翠红山			二长花岗岩	LA-ICPMS	197 ± 1	Fei <i>et al.</i> , 2018
78	ECHY-3	翠红山			二长花岗岩	LA-ICPMS	196 ± 2	Fei <i>et al.</i> , 2018
79	ECH58-57	翠红山			斑状花岗岩	LA-ICPMS	194 ± 3	Fei <i>et al.</i> , 2018
郟庐断裂带南侧								
80	DY144-1	北山	43°51'16"N	126°31'31"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	166 ± 2	Wu <i>et al.</i> , 2011
81	98SW124	江密峰	43°58'10"N	126°43'44"E	花岗闪长岩	SHRIMP	173 ± 4	Wu <i>et al.</i> , 2011
82	DY118-1	白石山	43°05'06"N	126°45'03"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	182 ± 2	Wu <i>et al.</i> , 2011
83	DY105-2	响水	44°14'27"N	126°54'28"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	172 ± 3	Wu <i>et al.</i> , 2011
84	98SW125	天岗	43°53'56"N	126°55'01"E	二长花岗岩	SHRIMP	175 ± 3	Wu <i>et al.</i> , 2011
85	98SW126	天岗	43°53'56"N	126°55'01"E	闪长质包体	SHRIMP	175 ± 4	Wu <i>et al.</i> , 2011
86	MG-7	天桥岗	43°50'54"N	126°58'50"E	正长花岗岩	SHRIMP	132 ± 3	孙德有等, 2005
87	9718-1	天桥岗	43°50'54"N	126°58'50"E	正长花岗岩	TIMS	190 ± 2	Wu <i>et al.</i> , 2003a
88	98SW122	白石山	43°34'31"N	127°34'22"E	花岗闪长岩	SHRIMP	190 ± 2	Wu <i>et al.</i> , 2011
89	FW02-184	白石山	43°34'22"N	127°34'30"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	181 ± 2	Wu <i>et al.</i> , 2011
90	FW02-188	白石山	44°38'49"N	127°44'52"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	187 ± 4	Wu <i>et al.</i> , 2011
91	9728-1	三道河	43°53'37"N	127°46'13"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	216 ± 3	孙德有等, 2005
92	H15-69-1	青云山	45°07'58"N	128°25'21"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	189 ± 1	Ge <i>et al.</i> , 2017
93	H15-70-1	青云山	45°07'58"N	128°25'22"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	200 ± 1	Ge <i>et al.</i> , 2017
94	H15-71-1	朝阳屯	45°04'35"N	128°30'00"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	198 ± 1	Ge <i>et al.</i> , 2017
95	11HNA11-1	拉拉沟	43°49'39"N	128°33'16"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	252 ± 2	Yu <i>et al.</i> , 2013
96	DY0519-1	魏漕河	44°02'18"N	128°39'52"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	266 ± 1	Wu <i>et al.</i> , 2011
97	STH-1	石河村西	44°52'22"N	128°40'26"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	201 ± 2	Qin <i>et al.</i> , 2016
98	H15-72-1	亮子岭	44°51'35"N	128°41'39"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	192 ± 1	Ge <i>et al.</i> , 2017
99	STH-2	石河村东	44°51'43"N	128°42'30"E	英云闪长岩	LA-ICPMS	198 ± 3	Qin <i>et al.</i> , 2016
100	11HNA4-1	小北湖	44°06'16"N	128°43'19"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	255 ± 2	Yu <i>et al.</i> , 2013
101	DY0540-2	发河村	44°31'33"N	128°48'19"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	196 ± 1	Wu <i>et al.</i> , 2011
102	97SW008	一面坡	44°55'49"N	128°54'38"E	长英质岩脉	SHRIMP	147 ± 10	Wu <i>et al.</i> , 2011
103	97SW009	虎峰	44°55'49"N	128°54'38"E	二长花岗岩	SHRIMP	179 ± 7	Wu <i>et al.</i> , 2011
104	DY0545-1	旧街村	44°23'25"N	129°03'38"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	185 ± 2	Wu <i>et al.</i> , 2011
105	DY0535-1	石河村	44°30'15"N	129°15'19"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	192 ± 1	Wu <i>et al.</i> , 2011
106	11HNA1-1	黄旗沟	44°23'02"N	129°26'19"E	石英闪长岩	LA-ICPMS	256 ± 1	Yu <i>et al.</i> , 2013
107	18HL-07-1	依兰	46°25'35"N	129°34'55"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	257 ± 3	本文
108	97SAW027	柴河	44°41'40"N	129°41'39"E	二长花岗岩	SHRIMP	254 ± 5	Wu <i>et al.</i> , 2001
109	P10-1	四号林场	47°22'51"N	129°59'27"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	234 ± 2	魏红艳等, 2012
110	14GW079	河兴	45°42'54"N	129°59'52"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	246 ± 2	Yang <i>et al.</i> , 2017
111	14GW083	东方红	45°41'49"N	130°00'12"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	253 ± 3	Yang <i>et al.</i> , 2017
112	97SAW028	楚山	45°07'27"N	130°02'30"E	花岗闪长岩	SHRIMP	256 ± 5	Wu <i>et al.</i> , 2001
113	14GW107	大马当	45°25'10"N	130°06'59"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	258 ± 2	Yang <i>et al.</i> , 2017
114	14GW074	生产	45°51'51"N	130°07'38"E	二长花岗岩	LA-ICPMS	258 ± 2	Yang <i>et al.</i> , 2017
115	14GW088	土城子	45°41'33"N	130°1'22"E	石英闪长岩	LA-ICPMS	250 ± 2	Yang <i>et al.</i> , 2017
116	14GW068	金峰	45°51'22"N	130°15'23"E	正长花岗岩	LA-ICPMS	254 ± 2	Yang <i>et al.</i> , 2017
117	14GW067	福兴	45°51'55"N	130°17'12"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	256 ± 2	Yang <i>et al.</i> , 2017
118	98SAW119	青山	45°28'52"N	130°34'26"E	花岗闪长岩	SHRIMP	270 ± 4	Wu <i>et al.</i> , 2001
119	14GW364	大二龙	45°30'34"N	130°36'49"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	275 ± 2	Yang <i>et al.</i> , 2017
120	14GW366	大二龙	45°30'34"N	130°36'49"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	274 ± 2	Yang <i>et al.</i> , 2017
121	M9A	石场	45°09'46"N	130°41'14"E	花岗闪长岩	SHRIMP	258 ± 9	Wu <i>et al.</i> , 2001
122	M9B	石场	45°09'46"N	130°41'14"E	花岗闪长岩	SHRIMP	267 ± 2	Wu <i>et al.</i> , 2001
123	14GW073	生产	45°51'54"N	130°9'05"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	249 ± 4	Yang <i>et al.</i> , 2017
124	12YQ01	永清	46°19'10"N	131°4'20"E	花岗闪长岩	LA-ICPMS	265 ± 1	张磊等, 2013
125	ST1	石林			正长花岗岩	LA-ICPMS	207 ± 3	孙珍军等, 2012
126	MZ06	美作			花岗闪长岩	LA-ICPMS	259 ± 4	黄映聪等, 2008

注: GPS 坐标已转化为统一的格式: XX° XX' XX" N, XX° XX' XX" E.

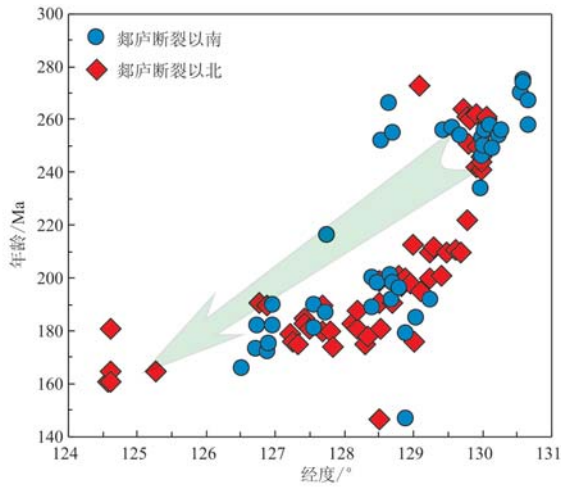


图 8 小兴安岭-张广才岭地区晚古生代至中生代花岗岩质岩石的锆石 U-Pb 年龄统计分布图(数据参照表 4)
Fig. 8 Zircon U-Pb crystallization ages of granitoids in Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains (data after Table 4)

4.2 岩石成因类型及源区特征

德裕镇岩体二长花岗岩主要矿物组成为石英、斜长石、钾长石和黑云母，含有少量锆石、榍石、磁铁矿和磷灰石等副矿物，其中缺少角闪石可能是由于分离结晶作用导致的 (Wu *et al.*, 2003a)。这些岩石富集 LILE 和 LREE，亏损 HFSE 和 HREE，A/CNK 值为 1.03 ~ 1.07，为弱过铝质花岗岩，具有岛弧 I 型花岗岩的矿物学和地球化学特征。在 $FeO^T/MgO - (Zr + Nb + Ce + Y)$ 和 $Zr - 10\ 000\ Ga/Al$ 图解上(图 9a, 9b)，这些样品都落入 I 型花岗岩区域，运用锆饱和温度计计算出的样品结晶温度为 771 ~ 795°C (Watson and Harrison, 1983; Hanchar and Watson, 2003)。以上特征均显示其为典型 I 型花岗岩。

通常认为，I 型花岗岩的岩浆来源主要有 3 种方式：① 基性下地壳岩石的部分熔融 (Chappell and

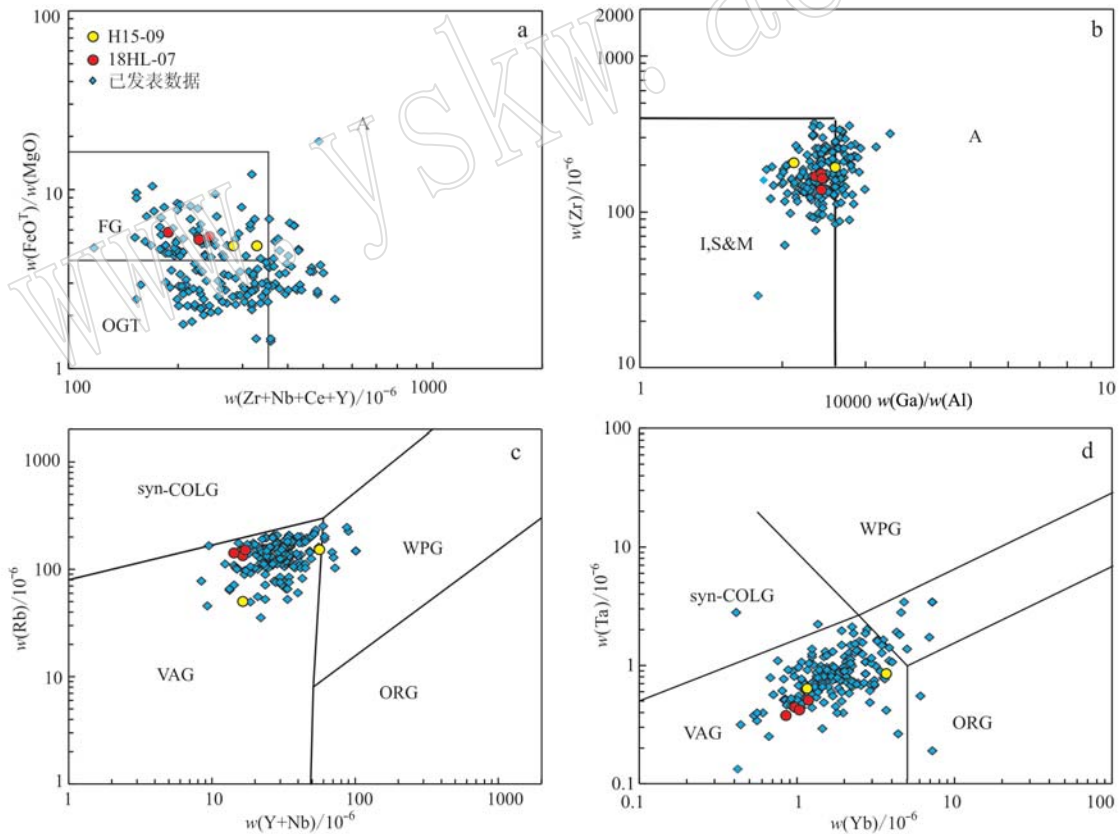


图 9 花岗岩分类图解和构造环境判别图解

Fig. 9 Petrogenetic and tectonic setting discrimination diagrams for the granitoids in Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains
a— $FeO^T/MgO - (Zr + Nb + Ce + Y)$ 图解; b— $Zr - Ga/Al$ 图解(据 Whalen *et al.*, 1987); c— $Rb - (Y + Nb)$ 图解; d— $Ta - Yb$ 图解(据 Pearce *et al.*, 1984); A—A 型花岗岩; FG—高分异的 M 型、I 型和 S 型花岗岩; OGT—未分异的 M 型、I 型和 S 型花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩; WPG—板内花岗岩; syn-COLG—同碰撞花岗岩
a— FeO^T/MgO versus $(Zr + Nb + Ce + Y)$ diagram; b— Zr versus Ga/Al diagram (after Whalen *et al.*, 1987); c— Rb versus $(Y + Nb)$ diagram; d— Ta versus Yb diagram (after Pearce *et al.*, 1984); A—A-type granite; FG—fractionated M-, I- and S-type granite; OGT—unfractionated M-, I- and S-type granite; VAG—volcanic arc granitoids; ORG—ocean ridge granitoids; WPG—within plate granitoids; syn-COLG—syn-collisional granitoids

White, 2001); ② 幔源基性岩浆的分离结晶作用 (Chen *et al.*, 2000); ③ 壳幔岩浆的混合作用 (Griffin *et al.*, 2002)。本次研究的早二叠世花岗岩在小兴安岭-张广才岭地区广泛分布, 构成巨型的南北向岩浆岩带 (Wu *et al.*, 2011; 刘恺等, 2016; Ge *et al.*, 2018)。由于同一时代的中基性岩浆岩出露范围较小, 如此大规模的酸性岩浆不太可能由幔源岩浆经分离结晶作用演化而来。此外, 镁铁质包体的缺失以及锆石 Hf 同位素的均匀分布, 说明壳幔岩浆

混合作用并不是德裕镇岩体花岗岩岩浆来源的主要途径。因此, 本文认为德裕镇岩体二长花岗岩岩浆主要来源于下地壳的部分熔融。这些岩石较弱的 Eu 负异常以及 P 和 Ti 元素的亏损则是由于长石、磷灰石和钛铁矿-榭石等矿物的分离结晶引起的 (图 10), 但是分离结晶程度较低。岩石具有较高的 Sr/Y 和 $(La/Yb)_N$ 值, 具有埃达克质岩石的特征, 表明岩浆源区残留石榴子石和角闪石, 推测该时期地壳具有一定程度的加厚 (Condie, 2005; Wang *et al.*, 2005)。

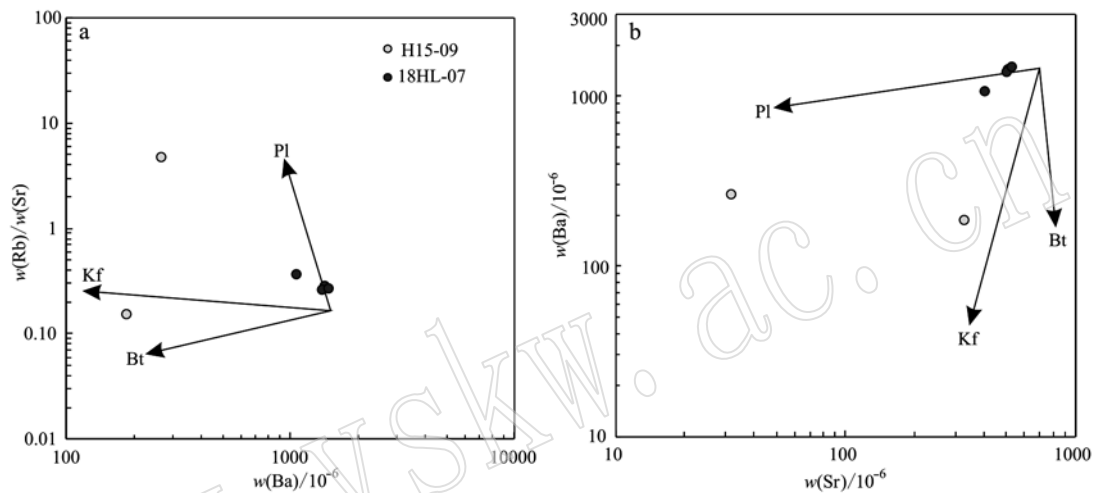


图 10 Rb/Sr - Ba(a)和 Ba - Sr(b)相关图解 (表明斜长石和钾长石的分离结晶作用, 图中方向线改自 Hu *et al.*, 2018)

Fig. 10 Rb/Sr versus Ba (a) and Ba versus Sr (b) diagrams (showing the fractionation of plagioclase and K-feldspar, the vectors after Hu *et al.*, 2018)

桃山镇岩体二长花岗岩的主要矿物组成与德裕镇岩体二长花岗岩类似, 而且同样不存在镁铁质包体, 具有 I 型花岗岩的地球化学特征, 其较高的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量、低的 MgO 含量和 $Mg^{\#}$ 值, 指示桃山镇岩体岩浆源区主要为壳源物质, 没有幔源岩浆的加入 (Barbarin, 1999; Xu *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2016)。但是, 相比于德裕镇岩体二长花岗岩, 桃山镇岩体二长花岗岩具有相对较高的 SiO_2 含量和 A/CNK 值 (1.07 ~ 1.12), 并且具有明显的 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Eu 和 Ti 等元素的负异常 (图 7b), 表明其岩浆在迁移侵位过程中经历了高度的结晶分异作用 (Wu *et al.*, 2003a, 2003b)。其中, Nb-Ta-Ti 的亏损可能是由于含 Ti 矿物 (如钛铁矿和榭石等) 的分离结晶引起的, P 的亏损可能是由于磷灰石的分离结晶引起的, Sr 和 Ba 以及 Eu 的亏损则是由于钾长石和斜长石的分离结晶产生的 (图 10; Wu *et al.*, 2003a)。根据锆石 Hf 同位素组成 [$\epsilon_{Hf}(t) = +1.7 \sim +4.1$], 本文认为铁力地区二长花岗岩的

岩浆源区主要为中新元古代地壳物质, 并且岩石中的捕获锆石具有相似的 Hf 同位素组成 [$\epsilon_{Hf}(t) = +2.9 \sim +4.7$], 表明中新元古代地壳物质很可能是铁力地区不同期次岩浆作用的主要源岩。综上, 本文认为铁力地区的二长花岗岩岩浆主要来自于中新元古代下地壳的部分熔融, 在岩浆演化过程中经历了以长石为主的高度分离结晶作用。

4.3 构造意义

前人对小兴安岭-张广才岭地区花岗岩类岩石进行了大量的地质年代学和地球化学方面的研究 (Meng *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2011; 魏红艳等, 2012; Wang *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2013; Ge *et al.*, 2017, 2018; Zhu *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2018), 本文对此进行了简要的归纳总结, 如图 6 ~ 9 所示。

从地球化学数据可以看出 (图 6、图 7), 小兴安岭-张广才岭地区晚古生代至中生代的花岗质岩石主要为中钾-高钾钙碱性的中酸性岩, 岩石类型包

括正长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩和石英闪长岩等,其 A/CNK 值总体小于 1.1,为准铝质-弱过铝质花岗岩。这些花岗岩都明显富集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损高场强元素和重稀土元素,具有火山弧岩浆岩的地球化学特征(Wilson, 1989; Tang *et al.*, 2016)。在构造判别图解上(图 9c、9d),样品几乎都投在火山弧花岗岩区域,可以初步推测研究区在晚古生代至中生代期间处于活动大陆边缘环境。这一结论还可从以下两方面得到论证:

(1) 小兴安岭-张广才岭地区出露同时代近南北向分布的中基性火山岩,并且这些火山岩具有火山弧岩浆岩的地球化学特征,已有的研究认为是由牡丹江洋的西向俯冲产生的(Meng *et al.*, 2011; Yu *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2013; Guo *et al.*, 2015; Dong *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2017);

(2) 黑龙江杂岩带作为牡丹江洋俯冲闭合的最直接证据,与小兴安岭-张广才岭岩浆岩带呈南北向近平行分布(Zhou *et al.*, 2009; 周建波等, 2013; Ge *et al.*, 2016)。此外,大量的研究表明,黑龙江杂岩的变质时代为 202 ~ 172 Ma,与研究区的部分花岗岩形成时代相重叠,指示同期由俯冲引起的变质-岩浆作用(Wu *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2009; Ge *et al.*, 2016; Dong *et al.*, 2019)。

通过总结小兴安岭-张广才岭地区花岗岩类岩石的时空分布规律(图 8),发现该地区晚古生代至中生代的岩浆岩具有自东向西形成时代逐渐变年轻的趋势。这一现象与美国西部 120 Ma 以来的岩浆岩自西向东逐渐变年轻的分布规律十分相似,而 Keith (1978) 和 Humphreys 等(2003) 对其解释为这一时期东太平洋板块向北美大陆俯冲角度逐渐变缓所引起的结果。因此,本文推测,小兴安岭-张广才岭地区岩浆岩的这一时空分布特征可能是由于小兴安岭-张广才岭东侧的牡丹江洋在晚古生代至中生代期间由于俯冲角度逐渐变缓造成的。

5 结论

(1) 铁力和依兰地区的二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 188 ± 1 Ma 和 257 ± 3 Ma,表明小兴安岭-张广才岭地区在晚二叠世和早侏罗世期间存在两期岩浆作用。

(2) 地球化学和锆石 Hf 同位素数据显示,铁力和依兰地区的二长花岗岩均为 I 型花岗岩。其中,

铁力地区花岗岩的岩浆源区可能来自于中新元古代的下地壳部分熔融。

(3) 通过综合前人已发表的数据,初步推测小兴安岭-张广才岭地区在晚古生代至中生代期间处于活动大陆边缘环境;同时,建立该地区晚古生代至中生代岩浆岩由东向西逐渐变年轻的时空分布格架,进而提出这一分布特征可能是由于牡丹江洋在这一时期俯冲角度逐渐变缓造成的。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59 ~ 79.
- Bao Zhenyan, Wang Jian, Yang Yanchen, *et al.* 2014. U-Pb dating and Hf isotopic composition of ore-hosting granites from the Pingdingshan gold deposit, Heilongjiang Province, and its geological implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(3): 407 ~ 420 (in Chinese with English abstract).
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46(3): 605 ~ 626.
- Chappell B W and White A J R. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48: 489 ~ 499.
- Chen J F, Zhou T X, Xie Z, *et al.* 2000. Formation of positive $\epsilon\text{Nd}(T)$ granitoids from the Alataw Mountains, Xinjiang, China, by mixing and fractional crystallization: Implication for Phanerozoic crustal growth[J]. *Tectonophysics*, 328: 53 ~ 67.
- Cheng Guohua, Wang Ruiliang, Zeng Qingdong, *et al.* 2015. Zircon U-Pb ages, Hf isotopes of the granitoids and Re-Os ages of the molybdenites in Luming molybdenum ore area, Heilongjiang Province, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(8): 2 450 ~ 2 464 (in Chinese with English abstract).
- Condie K C. 2005. TTGs and adakites: are they both slab melts? [J]. *Lithos*, 80: 33 ~ 44.
- Dong Y, Ge W C, Yang H, *et al.* 2017. Permian tectonic evolution of the Mudanjiang Ocean: Evidence from zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemistry of a N-S trending granitoid belt in the Jiamusi Massif, NE China[J]. *Gondwana Research*, 49: 147 ~ 163.
- Dong Y, Ge W C, Yang H, *et al.* 2019. Geochemical and SIMS U-Pb rutile and LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronological evidence of the tectonic evolution of the Mudanjiang Ocean from amphibolites of the Heilongjiang Complex, NE China[J]. *Gondwana Research*, 69: 25 ~ 44.

- Fei X, Zhang Z, Cheng Z, *et al.* 2018. Highly differentiated magmas linked with polymetallic mineralization: A case study from the Cuihongshan granitic intrusions, Lesser Xing'an Range, NE China [J]. *Lithos*, 302: 158 ~ 177.
- Gao F H, Xu W L, Yang D B, *et al.* 2007. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating from granitoids in southern basement of Songliao basin: Constraints on ages of the basin basement [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(7): 995.
- Gao Yang, Zhang Zhaochong and Yang Tiezheng. 2009. Geology-geochemistry and petrogenesis of Late Hercynian granites in Baoshan area, Heilongjiang Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 433 ~ 449 (in Chinese with English abstract).
- Ge M H, Zhang J J, Li L, *et al.* 2017. Geochronology and geochemistry of the Heilongjiang Complex and the granitoids from the Lesser Xing'an-Zhangguangcai Range: Implications for the late Paleozoic-Mesozoic tectonics of eastern NE China [J]. *Tectonophysics*, 717: 565 ~ 584.
- Ge M H, Zhang J J, Li L, *et al.* 2018. A Triassic-Jurassic westward scissor-like subduction history of the Mudanjiang Ocean and amalgamation of the Jiamusi Block in NE China: Constraints from whole-rock geochemistry and zircon U-Pb and Lu-Hf isotopes of the Lesser Xing'an-Zhangguangcai Range granitoids [J]. *Lithos*, 302: 263 ~ 277.
- Ge M H, Zhang J J, Li L, *et al.* 2019. Ages and geochemistry of Early Jurassic granitoids in the Lesser Xing'an-Zhangguangcai Ranges, NE China: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Lithosphere*, 11: 804 ~ 820.
- Ge M H, Zhang J J, Liu K, *et al.* 2016. Geochemistry and geochronology of the blueschist in the Heilongjiang Complex and its implications in the late Paleozoic tectonics of eastern NE China [J]. *Lithos*, 261: 232 ~ 249.
- 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 [J]. *Lithos*, 61: 237 ~ 269.
- Guo F, Li H X, Fan W M, *et al.* 2015. Early Jurassic subduction of the Paleo-Pacific Ocean in NE China: Petrologic and geochemical evidence from the Tumen mafic intrusive complex [J]. *Lithos*, 224: 46 ~ 60.
- Guo P, Xu W L, Yu J J, *et al.* 2016. Geochronology and geochemistry of Late Triassic bimodal igneous rocks at the eastern margin of the Songnen-Zhangguangcai Range Massif, Northeast China: Petrogenesis and tectonic implication [J]. *International Geology Review*, 58(2): 196 ~ 215.
- Hanchar J M and Watson E B. 2003. Zircon saturation thermometry [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 89 ~ 112.
- HBCMR (Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resources). 1993. Regional Geology of Heilongjiang Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 734 (in Chinese).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 595 ~ 2 604 (in Chinese with English abstract).
- Hu F, Liu S, Ducea M N, *et al.* 2018. Interaction among magmas from various sources and crustal melting processes during continental collision: Insights from the Huayang intrusive complex of the South Qinling belt, China [J]. *Journal of Petrology*, 59: 735 ~ 770.
- Hu X L, Ding Z J, He M C, *et al.* 2014a. A porphyry-skarn metallogenic system in the Lesser Xing'an Range, NE China: Implications from U-Pb and Re-Os geochronology and Sr-Nd-Hf isotopes of the Luming Mo and Xulaojiugou Pb-Zn deposits [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 90: 88 ~ 100.
- Hu X L, Ding Z J, He M C, *et al.* 2014b. Two epochs of magmatism and metallogeny in the Cuihongshan Fe-polymetallic deposit, Heilongjiang Province, NE China: Constrains from U-Pb and Re-Os geochronology and Lu-Hf isotopes [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 143: 116 ~ 126.
- Huang Yingcong, Ren Donghui, Zhang Xingzhou, *et al.* 2008. Zircon U-Pb dating of the Meizuo granite and geological significance in the Huanan uplift, east Heilongjiang Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(4): 631 ~ 638 (in Chinese with English abstract).
- Humphreys E, Hessler E, Dueker K, *et al.* 2003. How Laramide-age hydration of North American lithosphere by the Farallon slab controlled subsequent activity in the western United States [J]. *International Geology Review*, 45(7): 575 ~ 595.
- Irvine T N J and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523 ~ 548.
- Jahn B M, Windley B, Natal'in B, *et al.* 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 599 ~ 603.
- Jahn B M, Wu F Y and Chen B. 2000a. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic [J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 91(1 ~ 2): 181 ~ 193.
- Jahn B M, Wu F Y and Hong D W. 2000b. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia [J]. *Journal of Earth System Science*, 109(1): 5 ~ 20.
- Keith S B. 1978. Paleosubduction geometries inferred from Cretaceous and Tertiary magmatic patterns in southwestern North America [J]. *Geology*, 6(9): 516 ~ 521.
- Liu Jianfeng, Chi Xiaoguo, Dong Chunyan, *et al.* 2008. Discovery of Early

- Paleozoic granites in the eastern Xiao Hinggan Mountains, northeastern China and their tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(4): 534~544(in Chinese with English abstract).
- Liu K, Zhang J J, Wilde S A, *et al.* 2017. Initial subduction of the Paleo-Pacific Oceanic plate in NE China: Constraints from whole-rock geochemistry and zircon U-Pb and Lu-Hf isotopes of the Khanka Lake granitoids[J]. *Lithos*, 274: 254~270.
- Liu Kai, Zhang Jinjiang, Ge Maohui, *et al.* 2016. Mesozoic subduction of the paleo-Pacific plate along the eastern margin of the Xing-Meng Orogenic Belt[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(6): 1 098~1 108(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3. 0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center: Spec. Pub., 1~71.
- Ma X H, Cao R, Zhou Z H, *et al.* 2015. Early Cretaceous high-Mg diorites in the Yanji area, northeastern China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 393~405.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635~643.
- Meng E, Xu W L, Pei F P, *et al.* 2011. Permian bimodal volcanism in the Zhangguangcai Range of eastern Heilongjiang Province, NE China: Zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemical evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(2): 119~132.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63~81.
- Pei F P, Xu W L, Yang D B, *et al.* 2007. Zircon U-Pb geochronology of basement metamorphic rocks in the Songliao Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(7): 942~948.
- Pitcher W S. 1983. Granite type and tectonic environment[A]. Hsu K. Mountain Building Processes[C]. Academic Press, 19~40.
- Qin J F, Lai S C, Li Y F, *et al.* 2016. Early Jurassic monzogranite-tonalite association from the southern Zhangguangcai Range: Implications for paleo-Pacific plate subduction along northeastern China[J]. *Lithosphere*, 8(4): 396~411.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 184(1~2): 123~138.
- Safonova I Y and Santosh M. 2014. Accretionary complexes in the Asia-Pacific region: Tracing archives of ocean plate stratigraphy and tracking mantle plumes[J]. *Gondwana Research*, 25: 126~158.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495~500(in Chinese with English abstract).
- Sorokin A A, Kotov A B, Kudryashov N M, *et al.* 2016. Early Mesozoic granitoid and rhyolite magmatism of the Bureya Terrane of the Central Asian Orogenic Belt: Age and geodynamic setting[J]. *Lithos*, 261: 181~194.
- Sorokin A A, Kotov A B, Sal'nikova E B, *et al.* 2010. Granitoids of the Tyrma-Bureya complex 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, Wu Fuyuan and Gao Shan. 2004. LA-ICP MS zircon U-Pb age of the Qingshui pluton in the east Xiao Hinggan Mountains[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(2): 213~218(in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou, Wu Fuyuan, Gao Shan, *et al.* 2005. 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[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 263~275(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[A]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins: Geological Society London Special Publications, 42(1): 313~345.
- Sun Zhenjun, Sun Fengyue, Sun Guosheng, *et al.* 2012. Geochemical features and geochronology of the Shilin Park Mo-W mineralization in the northern foot of Lesser Xing'an Range[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 42(S3): 25~37(in Chinese with English abstract).
- Tang J, Xu W L, Wang F, *et al.* 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[J]. *Gondwana Research*, 31: 218~240.
- Van A E, Ryan C G, Jackson S E, *et al.* 2001. Data Reduction Software for LA-ICP-MS[M]. Laser-Ablation-ICP-Mass Spectrom. Earth Sci. Princ. Appl., 29: 239~243.
- Wang F, Xu W L, Meng E, *et al.* 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[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 234~248.
- Wang Q, McDermott F, Xu J F, *et al.* 2005. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: Lower-crustal melting in an intra-continental setting[J]. *Geology*, 33: 465~468.
- Wang Z W, Xu W L, Pei F P, *et al.* 2016. Geochronology and geochem-

- istry of early Paleozoic igneous rocks of the Lesser Xing'an Range, NE China: Implications for the tectonic evolution of the eastern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 261: 144 ~ 163.
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295 ~ 304.
- Wei Hongyan, Sun Deyou, Ye Songqing, *et al.* 2012. Zircon U-Pb ages and its geological significance of the granitic rocks in the Yichun-Hegang region, southeastern Xiao Hinggan Mountains [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(S1): 50 ~ 59 (in Chinese with English abstract).
- Wei Lianxi, Sun Fengyue, Xue Mingxuan, *et al.* 2013. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of the granites in Chenming area, southeastern Xiao Hinggan Mountains [J]. *Global Geology*, 32(2): 229 ~ 235 (in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407 ~ 419.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach* [M]. Springer Science & Business Media, 1 ~ 466.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, *et al.* 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China [J]. *Tectonophysics*, 328(1 ~ 2): 89 ~ 113.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, *et al.* 2003a. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis [J]. *Lithos*, 66(3 ~ 4): 241 ~ 273.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, *et al.* 2003b. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic [J]. *Lithos*, 67(3 ~ 4): 191 ~ 204.
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, *et al.* 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research [J]. *Science China Earth Sciences*, 60(7): 1 201 ~ 1 219.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, *et al.* 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1 ~ 30.
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, *et al.* 2001. The nature of basement beneath the Songliao Basin in NE China: Geochemical and isotopic constraints [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9 ~ 10): 793 ~ 803.
- Wu F Y, Yang J H, Lo C H, *et al.* 2007. The Heilongjiang Group: A Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China [J]. *Island Arc*, 16(1): 156 ~ 172.
- 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 [J]. *Chemical Geology*, 234(1 ~ 2): 105 ~ 126.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou and Lin Qiang. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181 ~ 189 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1 589 ~ 1 604 (in Chinese with English abstract).
- Xu Meijun, Xu Wenliang, Wang Feng, *et al.* 2013. Geochronology and geochemistry of the Early Jurassic granitoids in the central Lesser Xing'an Range, NE China and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 354 ~ 368 (in Chinese with English abstract).
- 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 [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 392 ~ 402.
- 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 [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 167 ~ 193.
- Yang H, Ge W C, Dong Y, *et al.* 2017. Record of Permian-Early Triassic continental arc magmatism in the western margin of the Jiamusi Block, NE China: Petrogenesis and implications for Paleo-Pacific subduction [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 106(6): 1 919 ~ 1 942.
- Yang H, Ge W C, Zhao G C, *et al.* 2015. Early Permian-Late Triassic granitic magmatism in the Jiamusi-Khanka Massif, eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt and its implications [J]. *Gondwana Research*, 27(4): 1 509 ~ 1 533.
- Yang Yanchen, Han Shijiong, Sun Deyou, *et al.* 2012. Geological and geochemical features and geochronology of porphyry molybdenum deposits in the Lesser Xing'an Range-Zhangguangcai Range metallogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 379 ~ 390 (in Chinese with English abstract).
- Yu Chao, Yang Zhiming, Zhou Limin, *et al.* 2019. Impact of laser focus on accuracy of U-Pb dating of zircons by LA-ICPMS [J]. *Mineral Deposits*, 38(1): 21 ~ 28 (in Chinese with English abstract).
- 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 [J]. *Lithos*, 142: 256 ~ 266.
- Yu J J, Wang F, Xu W L, *et al.* 2013. Late Permian tectonic evolution at the southeastern margin of the Songnen-Zhangguangcai Range Massif, NE China: Constraints from geochronology and geochemistry of

- granitoids[J]. *Gondwana Research*, 24(2): 635 ~ 647.
- 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[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353 ~ 370.
- Zhang Lei, Li Qiugen, Shi Xingjun, *et al.* 2013. Zircon U-Pb age and geochemistry of the Permian Yongqing granodiorite intrusion in the Jiamusi massif of Northeast China and their implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(6): 1 022 ~ 1 036(in Chinese with English abstract).
- Zhao D, Ge W C, Yang H, *et al.* 2018. Petrology, geochemistry, and zircon U-Pb-Hf isotopes of Late Triassic enclaves and host granitoids at the southeastern margin of the Songnen-Zhangguangcai Range Massif, Northeast China: Evidence for magma mixing during subduction of the Mudanjiang oceanic plate[J]. *Lithos*, 312: 358 ~ 374.
- Zhou Jianbo, Han Jie, Simon A Wilde, *et al.* 2013. A primary study of the Jilin-Heilongjiang high-pressure metamorphic belt: Evidence and tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 386 ~ 398(in Chinese with English abstract).
- Zhou J B and Li L. 2017. The Mesozoic accretionary complex in Northeast China: Evidence for the accretion history of Paleo-Pacific subduction [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 91 ~ 100.
- 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[J]. *Tectonophysics*, 478(3 ~ 4): 230 ~ 246.
- Zhu C Y, Zhao G C, Sun M, *et al.* 2017. Subduction between the Jiamusi and Songliao blocks: Geochronological and geochemical constraints from granitoids within the Zhangguangcailing orogen, northeastern China[J]. *Lithosphere*, 9(4): 515 ~ 533.
- 包真艳, 王 建, 杨言辰, 等. 2014. 黑龙江平顶山金矿赋矿花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其构造意义[J]. *地质学报*, 88(3): 407 ~ 420.
- 程国华, 王瑞良, 曾庆栋, 等. 2015. 黑龙江鹿鸣钼矿区花岗岩杂岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素、辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 31(8): 2 450 ~ 2 464.
- 高 阳, 张招崇, 杨铁铮. 2009. 黑龙江宝山一带海西晚期强过铝花岗岩地质地球化学特征及岩石成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 433 ~ 449.
- 黑龙江省地质矿产局. 1993. 黑龙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 734.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. *岩石学报*, 23(10): 2 595 ~ 2 604.
- 黄映聪, 任东辉, 张兴洲, 等. 2008. 黑龙江省东部桦南隆起美作花岗岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 38(4): 631 ~ 638.
- 刘建峰, 迟效国, 董春艳, 等. 2008. 小兴安岭东部早古生代花岗岩的发现及其构造意义[J]. *地质通报*, 27(4): 534 ~ 544.
- 刘 恺, 张进江, 葛茂卉, 等. 2016. 中生代兴安造山带东缘的古太平洋板块俯冲[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 35(6): 1 098 ~ 1 108.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 495 ~ 500.
- 孙德有, 吴福元, 高 山. 2004. 小兴安岭东部清水岩体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定[J]. *地球学报*, 25(2): 213 ~ 218.
- 孙德有, 吴福元, 高 山, 等. 2005. 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[J]. *地质学前沿*, 12(2): 263 ~ 275.
- 孙珍军, 孙丰月, 孙国胜, 等. 2012. 小兴安岭北麓石林公园区钼钨矿化成矿地球化学特征及年代学[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(S3): 25 ~ 37.
- 魏红艳, 孙德有, 叶松青, 等. 2012. 小兴安岭东南部伊春-鹤岗地区花岗岩质岩石锆石 U-Pb 年龄测定及其地质意义[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 37(S1): 50 ~ 59.
- 魏连喜, 孙丰月, 薛明轩, 等. 2013. 小兴安岭东南部晨明地区早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征[J]. *世界地质*, 32(2): 229 ~ 235.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 47(7): 745 ~ 765.
- 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[J]. *岩石学报*, 15(2): 181 ~ 189.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 49(16): 1 589 ~ 1 604.
- 徐美君, 许文良, 王 枫, 等. 2013. 小兴安岭中部早侏罗世花岗岩的年龄学与地球化学及其构造意义[J]. *岩石学报*, 29(2): 354 ~ 368.
- 杨言辰, 韩世炯, 孙德有, 等. 2012. 小兴安岭-张广才岭成矿带斑岩型钼矿床岩石地球化学特征及其年代学研究[J]. *岩石学报*, 28(2): 379 ~ 390.
- 于 超, 杨志明, 周利敏, 等. 2019. 激光焦平面变化对 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年准确度的影响[J]. *矿床地质*, 38(1): 21 ~ 28.
- 张 磊, 李秋根, 史兴俊, 等. 2013. 佳木斯地块中部二叠纪永清花岗岩长岩的锆石 U-Pb 年龄, 地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 32(6): 1 022 ~ 1 036.
- 周建波, 韩 杰, Simon A Wilde, 等. 2013. 吉林-黑龙江高压变质带的初步厘定: 证据和意义[J]. *岩石学报*, 29(2): 386 ~ 398.