

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.309>



吉林通化赤柏松地区早白垩世花岗质岩脉(株)的成因:锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和地球化学证据

周 皓,裴福萍*,焦 骥,王 枫,许文良

吉林大学地球科学学院,吉林长春 130061

摘 要: 中国吉林省通化县赤柏松地区早白垩世花岗质岩脉(株)的锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和全岩地球化学特征,为探讨华北克拉通东北部中生代时期大陆下地壳的属性和构造演化历史提供了重要依据. 研究区花岗质岩脉(株)中的锆石普遍发育振荡生长环带,并具有较高的 Th/U 比值(0.53~1.94),表明其为岩浆成因. 对采自花岗质岩脉(株)中 4 个样品的锆石 U-Pb 测年结果表明,它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 116 Ma、124 Ma、127 Ma 和 130 Ma,即早白垩世早期和早白垩世晚期. 这些花岗质岩石具有变化的 SiO_2 (60.61%~76.07%) 和 MgO (0.01%~2.48%) 含量、富碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=6.26\%\sim9.14\%$) 及富 Al_2O_3 (11.99%~16.13%) 的特征,总体属于高钾钙碱性系列岩石. 微量元素上富集轻稀土和大离子亲石元素,亏损重稀土和 Ba、Sr、P、Ti 和 Eu 等元素($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.05\sim0.30$),暗示其主要来自地壳岩石的部分熔融,并在演化过程中经历了斜长石、碱性长石、磷灰石和钛铁矿等矿物的分离结晶作用和围岩的同化混染作用. 与早白垩世早期花岗质岩石相比,早白垩世晚期岩石的碱性程度提高. 样品中锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -21.84~-10.74 之间,两阶段亏损地幔模式年龄为 1.86~2.56 Ga. 上述地球化学特征暗示,赤柏松地区下地壳以古元古代地壳物质为主,存在少量新太古代地壳物质. 早白垩世时期研究区以双峰式岩石组合为特征,进一步结合区域上已有的火成岩和区域构造演化的研究成果,认为早白垩世时期研究区处于俯冲背景下的伸展环境. 与早白垩世早期相比,早白垩世晚期伸展作用增强.

关键词: 早白垩世;通化赤柏松;花岗质岩脉(株);地球化学;锆石 Hf 同位素.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2020)02-519-15

收稿日期: 2018-12-30

Petrogenesis of Early Cretaceous Chibaisong Granitoid Dyke (Stock) from Tonghua Area, Jilin Province: Evidences from Zircon U-Pb Geochronology, Hf Isotope and Whole-Rock Geochemistry

Zhou Hao, Pei Fuping*, Jiao Ji, Wang Feng, Xu Wenliang

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

Abstract: LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology, whole-rock geochemistry and Hf isotope of zircons of Early Cretaceous Chibaisong granitoids in Tonghua area, southern Jilin Province, northeast (NE) China provide the insights into the nature of the lower crust and tectonic evolution of the eastern North China Craton (NCC). Zircons from the Chibaisong granitoid dyke (stock) show fine-scale oscillatory zoning, and relatively high Th/U ratios (0.53~1.94), indicative a magmatic origin. The weighted mean of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages for four samples from four granitoids are 116 Ma, 124 Ma, 127 Ma and 130 Ma, respectively. The Chibaisong

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2016YFC0600108-02);吉林大学研究生创新研究计划(No. 101832018C037).

作者简介: 周皓(1993-), 男, 硕士, 主要从事火成岩岩石学研究. ORCID: 0000-0003-1634-4230. E-mail: 1059454582@qq.com

* **通讯作者:** 裴福萍, ORCID: 0000-0002-6187-8488. E-mail: peifp@jlu.edu.cn

引用格式: 周皓,裴福萍,焦骥,等,2020. 锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和地球化学证据. 地球科学, 45(2):519-533.

granitoids have variable content of SiO_2 (60.61%-76.07%) and MgO (0.01%-2.48%), high content of total-alkali ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 6.26\% - 9.14\%$) and Al_2O_3 (11.99%-16.13%), characterized by the nature of high-K calc-alkaline series. Additionally, they show enrichment of LREEs and LILEs, depletion of HREEs and HFSEs, Ba, Sr, P, Ti and Eu ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.05 - 0.30$), suggesting that they were derived from the partial melting of the lower crust, and suffered from the fractional crystallization of plagioclase, alkali feldspar, apatite and ilmenite. Furthermore, they were assimilated by the country rock according to their variable major element contents and zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values. Granitoids were more alkaline in the early stage of the Early Cretaceous and $\text{Mg}^\#$ was increased, which may be attributed to mantle material. The zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values in the samples ranged from -21.84 to -10.74 , and the two-stage model ages of zircon Hf isotope of granite porphyry yield 1.86-2.56 Ga, which imply that the accretion of the lower crust within the Tonghua area mainly happened in the Paleoproterozoic, with small amounts during Neoproterozoic. The bimodal rock association in the Early Cretaceous, together with the results from the contemporaneous volcanic rocks and regional evolution history in this area, indicate that the granitoid dykes may formed in an extensional setting, and more strongly extension happened during the late stage of Early Cretaceous associated with the subduction of the Paleo-Pacific Plate beneath the Eurasian continent.

Key words: Early Cretaceous; Chibaisong; granitoid dyke (stock); geochemistry; zircon Hf isotope.

0 引言

华北克拉通破坏是近年来国内外研究的热点课题,关于克拉通破坏的空间分布范围、时间以及机制一直存在争论,而且至今尚未解决(Gao *et al.*, 2004, 2008; Wu *et al.*, 2005a; Xu *et al.*, 2006, 2008; Zheng *et al.*, 2006, 2007; Xu, 2007). 华北克拉通东北部的通化地区处于特殊的构造位置,北部紧邻中亚造山带东段,南部为辽吉古元古代造山带. 该地区在古元古代时期受辽吉古元古代造山作用的影响(路孝平等, 2004, 2005), 古生代一早中生代经历了古亚洲洋板块的俯冲和碰撞作用,而在侏罗—白垩纪又叠加了环太平洋构造体系的影响(Xu *et al.*, 2013). 由于其复杂的演化历史,使该地区成为研究克拉通破坏的空间分布范围、时间以及机制的关键场所之一.

通化地区中生代岩浆活动强烈,尤其是早白垩世岩浆作用,以广泛分布的早白垩世火山岩和侵入岩为特征(Yang *et al.*, 2004, 2006, 2007; Wu *et al.*, 2005a, 2005b; 吴福元等, 2005; 裴福萍等, 2009; 李超文等, 2010; Pei *et al.*, 2011a, 2011b; 隋振民和陈跃军, 2012). 通过对区内早白垩世花岗质岩浆作用的成因研究,部分学者认为研究区下地壳组成与华北克拉通内部下地壳组成明显不同,存在空间上的不均一性,显示从南向北,地壳组成具有新生物质增多的趋势(Pei *et al.*, 2011a, 2011b). 而对研究区内早白垩世火山岩的研究表明,东西方向上也显示出下地壳组成的差异性(裴福萍等, 2009). 但该研究仅限于对通化地区以东靠近鸭绿江超岩石圈断裂附近早白垩世花岗质岩石和火山岩的研究,那么

通化地区西部的赤柏松地区早白垩世时期的下地壳组成具有什么特征,地壳的增生时间和增生机制又如何?另外,区内存在大量热液成因的斑岩型金铜矿床(Zhang *et al.*, 2014, 2015, 2018),这些矿床的形成常与岩浆演化晚期的脉岩相伴生,脉岩的成因研究对于矿床成因研究意义重大.

基于上述问题,本文选择对华北克拉通东北部通化地区的花岗质岩脉(株)进行锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和全岩地球化学研究,查明其形成时代,进而探讨它们的岩浆源区性质、岩浆演化过程及形成的构造背景. 上述研究不仅对探讨华北克拉通东北部下地壳增生、再造事件以及中生代构造演化历史具有重要意义,同时有利于总结区域成矿规律,指导区域找矿.

1 地质背景及岩相学特征

华北克拉通是地球上最古老的克拉通之一,目前普遍认为,华北克拉通存在一个统一的太古代到古元古代的基底,上覆中元古代至新生代稳定的沉积盖层. 华北克拉通由东、西两部分块体以及 1.85~1.80 Ga 碰撞造山形成的中央造山带共同构成(Zhao *et al.*, 2001, 2005; Santosh, 2010; Zhai and Santosh, 2011; Zhao and Zhai, 2013; Tang *et al.*, 2015; Yang and Santosh, 2015),北部为中亚造山带,南部为秦岭—大别—苏鲁超高压造山带.

华北克拉通东北部由两个太古代陆块组成(北部的龙岗陆块以及南部的辽南—狼林陆块),两个陆块之间为辽吉古元古代造山带(Zhao *et al.*, 2001, 2005; 常瑞虹等, 2017). 辽南陆块由一系列强烈变形的太古代晚期闪长岩—英云闪长岩—花岗

闪长岩组成,锆石 U-Pb 测年结果显示这套太古代杂岩在 2 500 Ma 左右侵位(路孝平等, 2004, 2005). 而龙岗陆块由广泛分布的 TTG 杂岩体(英云闪长岩—奥长花岗岩—石英闪长岩)和少量的表壳岩组成(吴福元等, 1997). 位于两个陆块之间的辽—吉造山带发育古元古代火山岩和沉积岩(例如辽东半岛的辽河群以及吉林省南部的集安群和老岭群), 同时分布有大量的古元古代和太古代花岗岩(辽—吉花岗岩), 这些花岗岩主要形成于 1.85~2.65 Ga 之间(Ge *et al.*, 2003 以及其中文献), 它们的成因可能与龙岗陆块与辽南—狼林陆块之间的碰撞和随后的造山后伸展活动有关(路孝平等, 2004, 2005), 这些前寒武纪的岩石被早古生代地层不整合覆盖. 吉林省南部地区出露有少量的晚三叠世和侏罗纪的火山岩和侵入岩(裴福萍等, 2009; Yu *et al.*, 2009), 早白垩世侵入岩和火山岩在研究区广泛分布, 出露面积达 20 000 km²(Yu *et al.*, 2009; 裴福萍等, 2009; Pei *et al.*, 2011a, 2011b).

吉林省南部通化赤柏松地区位于华北克拉通东北部的龙岗陆块上(图 1a), 区内分布着许多不同岩石类型的岩脉(株), 从基性、酸性到偏碱性脉岩均有出露, 基性脉岩以橄榄苏长辉长岩、辉绿辉长岩、二辉橄榄岩为主(Pei *et al.*, 2011b). 酸性脉岩以

I 型和 A 型花岗岩为主, 其中 A 型花岗岩以正长花岗岩、碱长花岗岩等为代表(Pei *et al.*, 2011a; 秦亚等, 2013). 岩脉(株)总体走向为近南北向—北北东向, 脉长多在 0.5 km 左右, 脉宽 10~50 m 不等, 出露面积约 12 km²(图 1b), 侵入于不同时代的地层及岩体中. 本文样品采自吉林省通化县大都岭村地区的岩脉(株)中(图 1b), 岩脉(株)侵位的围岩为太古代鞍山群四道砬子河组, 少量岩脉(株)侵位于中生代地层中, 四道砬子河组岩石类型包括混合花岗岩、斜长角闪岩、黑云(角闪)斜长片麻岩以及二辉麻粒岩(路孝平等, 2004, 2005).

花岗斑岩/二长斑岩(CB3-2, CB3-3, CB3-4)采自大都岭村北西 300 m 处(GPS 坐标: N 41°37'16.4", E 125°40'34.4"). 样品 CB3-2 的岩相学特征如下: 风化面灰褐色, 新鲜面肉红色, 环斑球粒结构, 块状构造, 斑晶为石英、斜长石和正长石, 粒度大小 0.3~1.5 mm. 石英斑晶含量约为 30%, 颗粒边界平直, 无熔蚀现象, 石英斑晶周围被放射状长英质基质包围, 呈环斑球粒结构. 斜长石斑晶含量 15%, 碳酸盐化现象普遍. 正长石斑晶含量 5%, 部分颗粒中包含细小斜长石颗粒. 基质普遍为球粒结构, 副矿物为磷灰石和锆石(图 2a), 为花岗斑岩. 在同一岩株中采集的样品 CB3-3 中的石英斑晶含量较

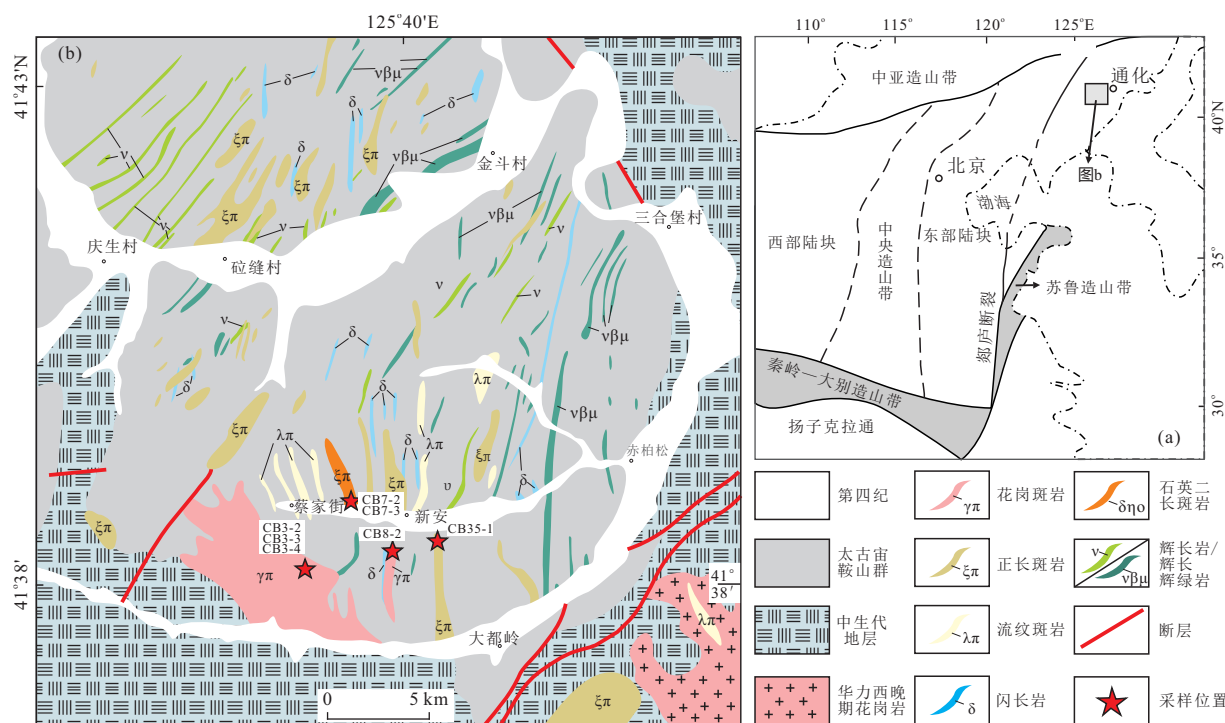


图1 华北克拉通构造简图(a)和通化赤柏松地区地质简图(b)

Fig.1 Simplified geological maps showing (a) major tectonic units of North China Craton and (b) of the Chibaisong area in Tonghua

少,约为5%,斜长石斑晶含量18%,正长石斑晶含量15%,属于二长斑岩. CB3-4中石英斑晶含量约为25%,斜长石斑晶含量15%,正长石斑晶含量5%,为花岗斑岩.

石英二长斑岩(CB7-2,CB7-3)采自新安村西500 m处(GPS坐标: N 41° 38'41.5", E 125° 39'45.4"). 风化面灰褐色,新鲜面肉红色,斑状结构,块状构造,斑晶为石英、斜长石和正长石. 石英斑晶周围被放射状长英质基质包围,呈环斑球粒结构(图2d),石英斑晶有熔蚀现象,粒度大小0.2~0.6 mm,含量约为18%. 斜长石含量15%,普遍具有碳酸盐化的现象. 正长石含量20%. 基质隐晶质,基质中见由长英质物质组成的放射状球粒. 不透明矿物和副矿物含量约1%左右,副矿物主要为磷灰石、榍石和不透明矿物(图2c).

花岗斑岩(CB8-2)采自蔡家村东南山坡边(GPS坐标: N 41°38'47.2", E 125°38'20.3"). 花岗斑岩成脉状,风化面深褐色,新鲜面肉红色,斑状结构,块状构造,斑晶以石英、斜长石为主,少量正长石. 石英含量约为35%,具有熔蚀现象. 斜长石含量15%,多数呈晶体聚集的特点. 正长石可见卡式双晶,含量5%,个别颗粒外部包裹斜长石. 基质显

微晶质结构,副矿物主要为磷灰石、锆石和不透明矿物(图2b).

正长斑岩(CB35-1)采自大都岭村西侧(GPS坐标: N 41°37'32", E 125°39'08"). 风化面灰褐色,新鲜面肉红色,斑状结构,块状构造. 斑晶主要为正长石和少量石英、斜长石. 斜长石含量10%,粒度较大,呈现堆晶特点. 石英有熔蚀现象,含量约为5%. 正长石可见卡氏双晶,含量约为25%,粒度0.5~2.0 mm,部分正长石中包含早期结晶的细小斜长石晶体. 基质球粒结构,副矿物主要为磷灰石和不透明矿物.

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 定年

锆石矿物由中国河北省廊坊市廊坊岩拓地质服务有限公司实验室采用标准的重、磁分选技术从全岩样品中提取. 锆石的透射光、反射光和阴极发光图像在中国西北大学大陆动力学国家重点实验室通过JEOL扫描电镜进行收集. 锆石 U-Pb测年实验在西北大学大陆动力学国家重点实验室的Agilent 7500a ICP-MS仪器上应用标准测定程序进行,

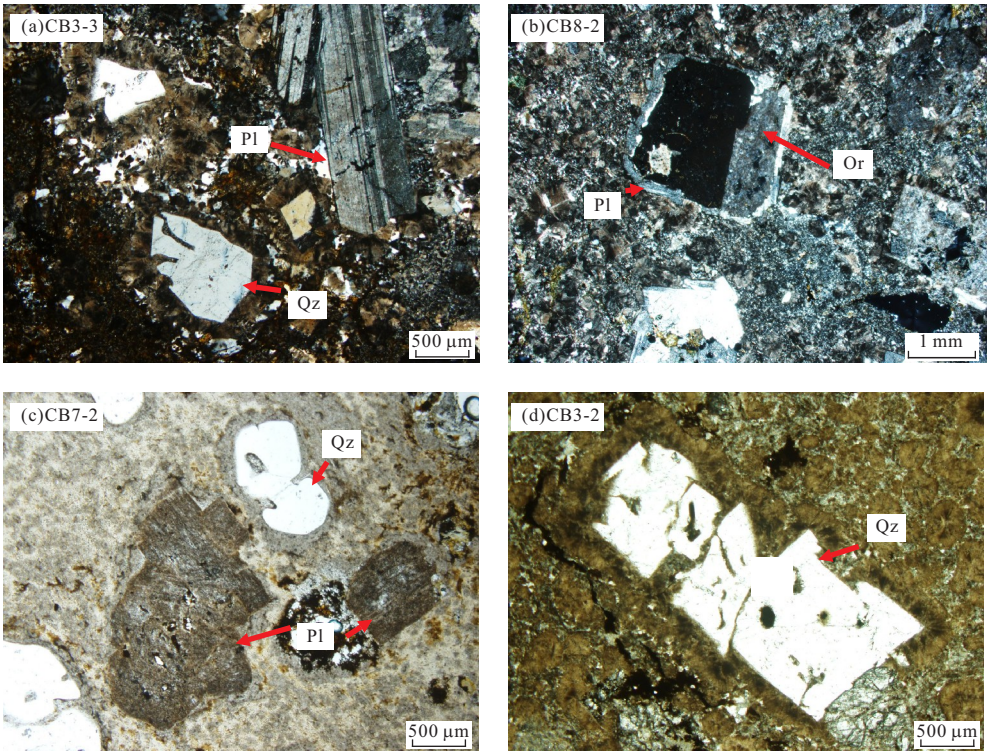


图2 通化赤柏松地区早白垩世花岗质岩石镜下照片

Fig.2 Photomicrographs showing the petrographic features of Early Cretaceous granitoids of the Chibaisong area in Tonghua
Qz. 石英;Or. 正长石;Pl. 斜长石;a. 花岗斑岩;b. 花岗斑岩;c. 石英的熔蚀结构、斜长石的碳酸盐化;d. 环斑球粒结构

详细的实验原理和流程见 Yuan *et al.* (2004). 应用标准锆石 91500 进行分馏校正, 标准锆石 Temora 1 作为未知样品获取的年龄为 415 ± 4 Ma [加权偏差平方 (MSWD) = 0.112, $n=24$] (Yuan *et al.*, 2004), 该锆石的 ID-TIMS 的标准年龄为 416.75 ± 0.24 Ma (Black *et al.*, 2004). 分析测试点的直径全部为 $30 \mu\text{m}$. 采用 Andersen (2002) 提出的方法进行同位素比值的校正, 以扣除普通铅的影响

2.2 主量元素和微量元素

主量元素和微量元素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 主量元素采用 X-荧光光谱法 (XRF) 分析; 微量元素的分析则采用电感耦

合等离子质谱 (ICP-MS) 分析方法. 对国际标样 BCR-2 (玄武岩)、BHVO-1 (玄武岩) 和 AGV-1 (安山岩) 的分析结果表明, 主量元素分析精度和准确度优于 5%, 微量元素的分析精度和准确度优于 10%.

2.3 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所配有 193 nm 激光取样系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) 上进行, 仪器的运行条件和详细的分析流程见 (Hu *et al.*, 2012a, 2012b). 测定时用锆石国际标样 91500 作外标, 分析时激光束斑直径为 $63 \mu\text{m}$, 所用的激光



图3 通化赤柏松地区早白垩世花岗质岩石中部分锆石的阴极发光图像

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images of selected zircon grains of Early Cretaceous granitoids of the Chibaisong area in Tonghua. 红色实线圆圈为 U-Pb 年龄测试点; 黄色虚线圆圈为 Hf 同位素测试点; 括号内为 Hf 同位素测试值; 左侧短横线为比例尺 $100 \mu\text{m}$

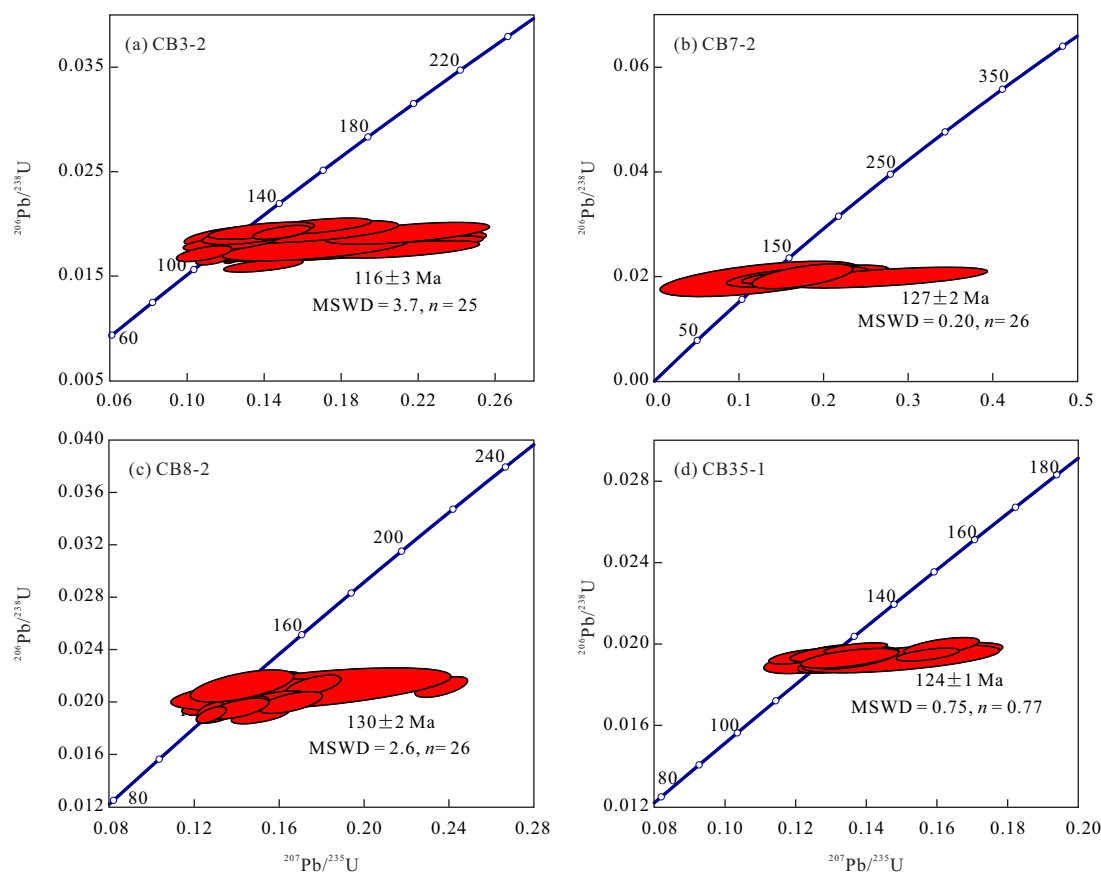


图 4 通化赤柏松地区早白垩世花岗质岩石锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谱和图

Fig.4 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams for Early Cretaceous granitoids in the Chibaisong area, Tonghua.

脉冲速率为 6~8 Hz, 激光束脉冲能量为 100 mJ, 对每个分析点的 Yb 和 Hf 的校正工作则主要是利用该分析点实测得出的平均值。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

本文对采自通化赤柏松地区 3 个岩脉和一个小岩株中的 4 个样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析, 部分锆石 CL 图像特征和所有锆石分析点的 U-Th-Pb 同位素组成分别见图 3 和表 1。从图 3 中可以看出, 锆石以自形为主, 长宽比介于 2:1~5:1 之间, 具有细微振荡生长环带, 锆石的 Th/U 比值大于 0.10 (0.53~1.94), 上述特征表明它们为岩浆成因 (Koschek, 1993)。

花岗斑岩样品 CB3-2 中的 25 粒锆石的 Th/U 比值为 0.61~1.94, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 103~126 Ma 之间, 25 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 116 ± 3 Ma (MSWD=3.70) (图 4a), 该年龄代表花岗斑岩的结晶年龄;

对样品 CB7-2 中的 26 粒锆石进行了 LA-ICP-MS 分析。该样品中锆石的 Th/U 比值为 0.53~1.19, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 124~133 Ma 之间, 26 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 127 ± 2 Ma (MSWD=0.20) (图 4b)。即该石英二长斑岩形成于 127 Ma 左右;

花岗斑岩样品 CB8-2 中 26 粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 121~136 Ma 之间, 它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 130 ± 2 Ma (MSWD=2.60) (图 4c)。该年龄代表了花岗斑岩的结晶年龄;

对正长斑岩样品 CB35-1 中 21 粒锆石进行了 LA-ICP-MS 分析。CB35-1 中锆石的 Th/U 比值为 0.56~1.63, 其 21 个点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 122~127 Ma 之间, 它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 124 ± 1 Ma (MSWD=0.75) (图 4d)。该年龄代表了花岗斑岩的结晶年龄。

综上所述, 通化赤柏松地区早白垩世花岗斑岩脉(株)的侵位时代可以分为两期: 早白垩世早期 (124~130 Ma) 和早白垩世晚期 (~116 Ma)。

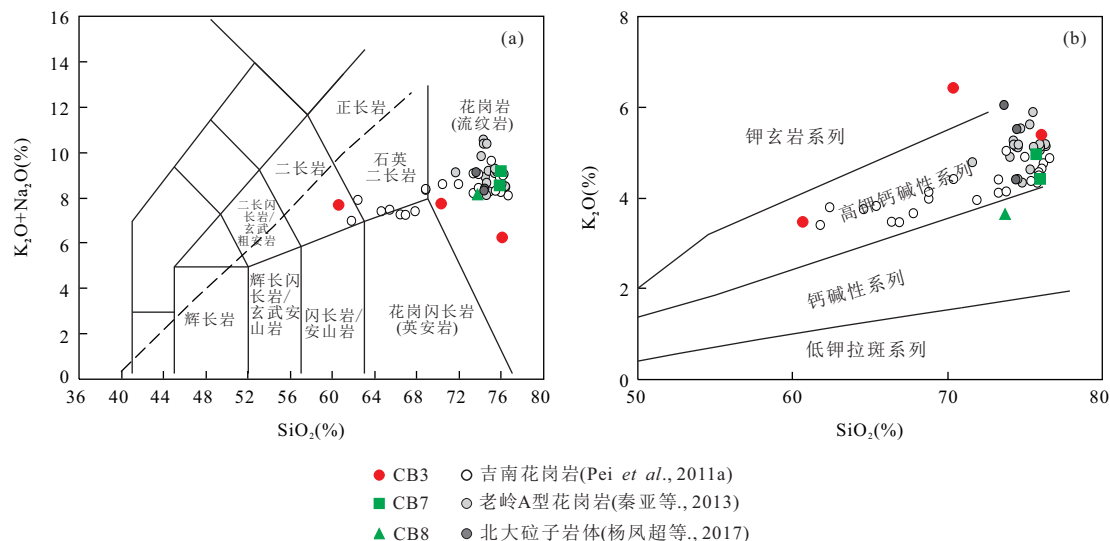


图5 (a)通化赤柏松地区早白垩世花岗质岩石 SiO_2 vs. $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 图解; (b) SiO_2 vs. K_2O 图解

Fig.5 Plots of SiO_2 vs. $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (a), SiO_2 vs. K_2O (b) for the Early Cretaceous granitoids in the Chibaisong area, Tonghua
据 Peccerillo and Taylor (1976), Middlemost (1994); 数据引自裴福萍等 (2009), Pei et al. (2011a), 杨凤超等 (2017), 秦亚等 (2013)

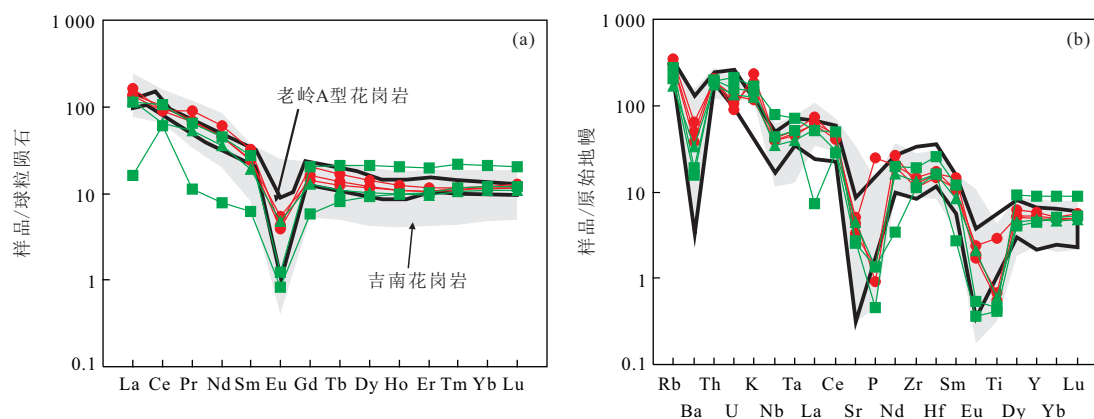


图6 通化赤柏松地区早白垩世花岗质岩石球粒陨石标准化稀土元素配分型式(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig.6 (a) Chondrite-normalized REE patterns and (b) primitive mantle (PM)-normalized trace element spider diagrams for the Early Cretaceous granitoids in the Chibaisong area, Tonghua

球粒陨石标准数据 Preston et al. (1985); 原始地幔标准化数据 Sun and McDonough (1984); 图例同图5

3.2 主量和微量元素特征

采自吉林省通化赤柏松花岗质岩脉(株)中六件样品的主、微量元素分析结果见表2,数据投图时已对烧失量进行校正.从表2中可以看出,早白垩世早期花岗斑岩—石英二长斑岩中 SiO_2 含量介于 73.68%~76.01%, 富碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.12\% \sim 9.14\%$) 和 Al_2O_3 (12.34%~13.12%), 变化的 MgO ($\text{Mg}^\# = 1.8 \sim 27.5$)、 CaO (0.12%~0.59%) 和 TiO_2 (0.09%~0.13%) 含量.在 TAS 图解上均落入花岗岩区域(图 5a),在 SiO_2 - K_2O 图解中落于钙碱性—高钾钙碱性系列区域(图 5b),整体特征与吉南地区北部同时期 I 型花岗岩和老岭 A 型花岗岩相似(Pei et

al., 2011a; 秦亚等, 2013). 其 A/CNK 值 [$\text{Al}/(\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$ (摩尔数比)] 介于 0.96~1.09; 早白垩世晚期花岗斑岩—二长斑岩中 SiO_2 含量变化较大 (60.61%~76.07%), 富碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 6.26\% \sim 7.77\%$) 和 Al_2O_3 (11.99%~16.13%) 含量的特征, 其 $\text{Mg}^\#$ 相对早白垩世早期有明显提高 ($\text{Mg}^\# = 13.1 \sim 44.9$). 在 TAS 图解上落入花岗岩和二长岩区域(图 5a), 在 SiO_2 - K_2O 图解中落入高钾钙碱性—钾玄岩系列(图 5b), 其 A/CNK 值 [$\text{Al}/(\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$ (摩尔数比)] 介于 0.91~1.33, 这与吉南地区南部同时期花岗质侵入体的特征相一致(Pei et al., 2011a).

在球粒陨石标准化稀土元素配分图解中, 本文

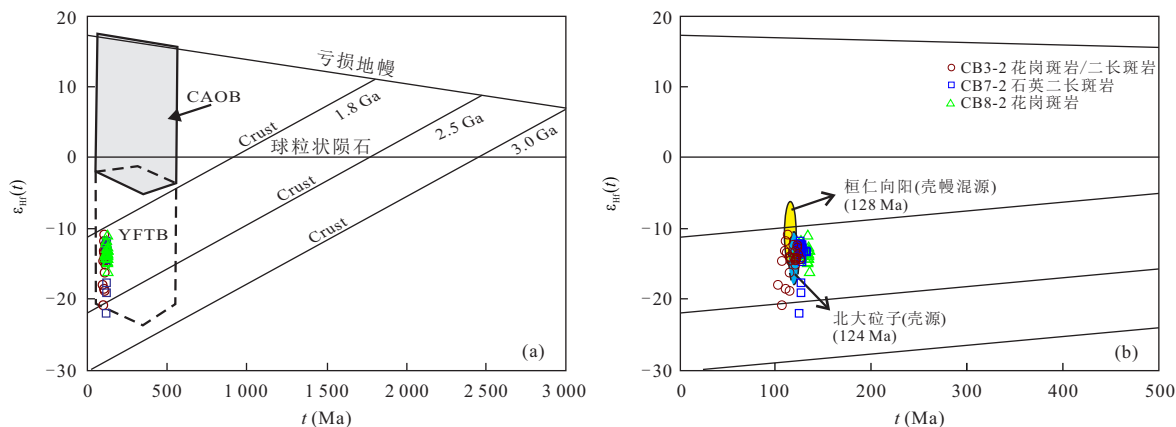


图 7 通化赤柏松地区早白垩世花岗质岩石的 Hf 同位素组成

Fig.7 Correlations between Hf isotopic compositions and ages of zircons for the Early Cretaceous granitoids in the Chibaisong area, Tonghua

据 Yang *et al.* (2006); CAOB. 中亚造山带; YFTB. 燕山褶皱带; 数据引自杨凤超等 (2017), Zhang *et al.* (2018)

中样品富集轻稀土元素、亏损重稀土元素 ($L_{\text{N}}/Y_{\text{bN}} = 1.36 \sim 13.74$), 轻稀土元素分馏明显, 重稀土元素变化较大 ($G_{\text{dN}}/Y_{\text{bN}} = 0.49 \sim 1.72$), 部分样品无明显分馏, 显示出四分组效应, 与高分异 I 型花岗岩的分配型式相近 (Masuda and Akagi, 1989; Bau, 1996; Irber, 1999; Monecke *et al.*, 2011; 吴福元等, 2017). 具有明显的 Eu 的负异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.05 \sim 0.30$) (图 6a), 其中早白垩世早期石英二长斑岩 Eu 的负异常最为强烈. 在原始地幔标准化图解中, 大部分样品都具有富集大离子亲石元素 (LILEs, 如 Rb、Th、U、K), 亏损 Ti、Sr、P 和 Ba 的特征, 并具有 Nb、Ta 和 Zr 的弱亏损 (图 6b), 早白垩世晚期二长斑岩的 P、Ti 含量相对较高.

3.3 锆石 Hf 同位素

通化赤柏松花岗质岩石中锆石 Hf 同位素的分析结果列于表 3, 3 个样品 (CB3-2、CB7-2、CB8-2) 的 71 个锆石微区 Hf 同位素的分析表明, 早白垩世早期石英二长斑岩和花岗斑岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 $0.282\ 081 \sim 0.282\ 368$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-20.69 \sim -10.74$ (图 7); 早白垩世晚期花岗斑岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 $0.282\ 049 \sim 0.282\ 355$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-21.84 \sim -10.94$ 之间 (图 7). 在计算两阶段模式年龄时, 采用硅铝质大陆地壳的 Lu/Hf 比值 ($f_{\text{Lu/Hf}} = -0.72$) 进行计算. 结果显示, 它们的 T_{DM2} (两阶段亏损地幔模式年龄) 分别介于 $1.88 \sim 2.56$ Ga 和 $1.86 \sim 2.48$ Ga (表 3).

4 讨论

4.1 通化赤柏松花岗质岩石的侵位时代

前人对吉林省通化赤柏松花岗质岩脉 (株) 的形成时代的确定主要依据其侵入中生代地层中, 将其形成时代确定为中生代, 但缺乏精确的同位素年代学证据. 本文样品中锆石显示清晰的振荡生长环带以及较高的 Th/U 比值 ($0.53 \sim 1.94$), 暗示其岩浆成因, 因此锆石的 U-Pb 定年结果代表了花岗质岩石的结晶年龄. 本文的锆石 U-Pb 定年结果表明, 吉林省通化赤柏松地区的花岗质岩脉 (株) 的形成时代为早白垩世, 分别为 116 Ma 与 $124 \sim 130$ Ma. 前人对吉南地区早白垩世侵入岩和火山岩定年结果显示, 同样可以划分为早白垩世早期和早白垩世晚期, 如花岗质岩浆的侵位时间主要集中在 ~ 118 Ma 与 $122 \sim 130$ Ma (秦亚, 2013; Pei *et al.*, 2011a), 吉南通化赤柏松地区广泛发育的基性—超基性岩的形成时代为 $129 \sim 137$ Ma (Pei *et al.*, 2011b). 另外, 吉林南部早白垩世火山岩也可分为两期, 早白垩世早期 ($131 \sim 130$ Ma, 包括果松组, 二股砬子组) 和早白垩世晚期 ($119 \sim 113$ Ma, 包括三棵榆树组, 四道沟组) (Chen *et al.*, 2008; 裴福萍等, 2009; Yu *et al.*, 2009; 隋振民和陈跃军, 2012).

综上所述, 吉南地区早白垩世存在早白垩世早期和早白垩世晚期两期岩浆事件, 这两期岩浆事件与中国东部早白垩世岩浆作用的期次相一致 (Yang *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2005).

4.2 通化赤柏松花岗质岩石的源区性质

首先, 除早白垩世晚期二长斑岩 (CB3-3) 外, 通

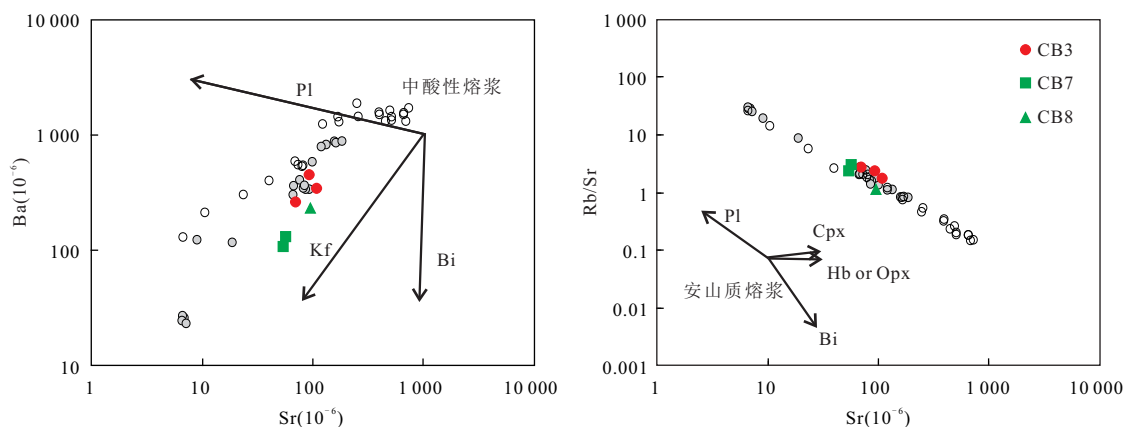
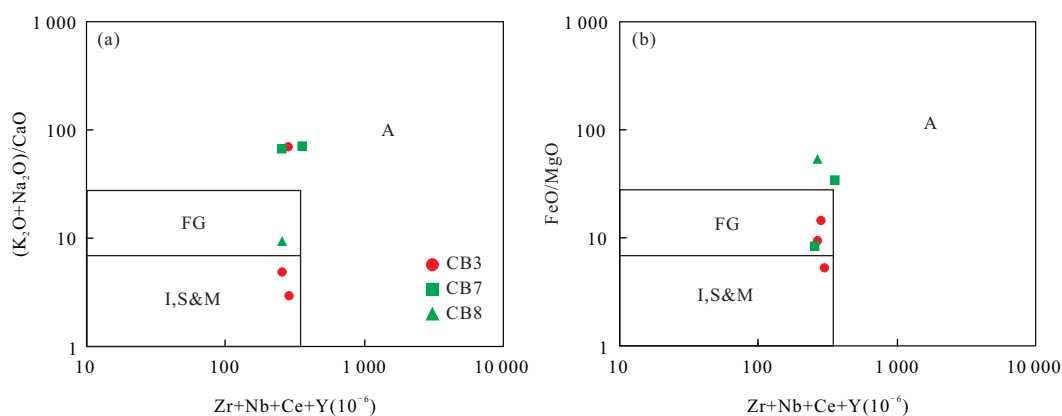


图8 通化赤柏松地区早白垩世花岗质岩石 Ba-Sr 和 Rb/Sr-Sr 图解(图例同图5)

Fig.8 Ba-Sr and Rb/Sr-Sr diagram for the Early Cretaceous granitoids in the Chibaisong area, Tonghua

图9 通化赤柏松地区早白垩世花岗质岩石的成因类型判别图解(a) $Zr+Nb+Ce+Y-(Na_2O+K_2O)/CaO$; (b) $Zr+Nb+Ce+Y-FeO^*/MgO$ (据 Whalen *et al.*, 1987)Fig.9 (a) $(Na_2O+K_2O)/CaO$ vs. $(Zr+Nb+Ce+Y)$ and (b) FeO^*/MgO vs. $(Zr+Nb+Ce+Y)$ discrimination diagrams

化赤柏松地区花岗质岩脉(株)表现出高 SiO_2 和富碱的特征,由于研究区内不存在大面积的基性岩浆产出,因此很难由幔源玄武质岩浆经历强烈的结晶分异作用形成;其次,赤柏松地区早白垩世早期花岗质岩脉中锆石具有较低的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值 ($-21.84 \sim -10.94$),这与研究区南部桓仁地区同时代来自壳源的北大砬子岩体的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ ($-13.32 \sim -19.97$, 杨凤超等, 2017) 相似,而不同于桓仁向阳地区同时代壳幔混合成因二长闪长岩中锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值 ($-14.3 \sim -7.8$) (Zhang *et al.*, 2018) (图 7),另外在野外调查中,通化赤柏松岩脉中并未发现幔源的暗色包体,镜下也未见到明显的矿物之间的不平衡现象,进一步排除了壳幔岩浆混合的岩石成因。那么,早白垩世早期花岗质岩石在演化过程中是否经历过分离结晶和同化混染作用呢?首先本文的样品显示出明显 Ba、Sr 和 Eu 的异常,暗示岩浆演化过程中存在斜长石和碱性长石的

分离结晶作用,在 Ba/Sr、Rb/Sr 与 Sr 的丰度相关图解中,利用斜长石、钾长石、黑云母、普通角闪石和辉石在安山质熔体以及中酸性岩石中的分配系数值模拟计算表明,在岩浆演化过程中还存在辉石和角闪石的分离结晶作用(图 8),其演化程度接近老岭地区 A 型花岗岩(秦亚等, 2013)。另外, P 和 Ti 的亏损应与磷灰石和钛铁矿的分离结晶作用有关。石英二长斑岩(127 Ma)相对于花岗斑岩(130 Ma)而言,其 SiO_2 含量提高, Ba、Sr 和 Eu 的负异常程度加深,在结晶分异图解中(图 8)其结晶分异程度也更大。由于花岗质岩脉(株)宽度较小,发生同化混染的可能性较大,而且,石英二长斑岩中锆石的 Hf 同位素变化较大,存在较低的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(表 3),结合其围岩为太古代变质岩,进一步表明原生岩浆在演化过程中经历了围岩的同化混染作用。研究区内早白垩世早期岩脉岩石类型包括石英二长斑岩和花岗斑岩。通化赤柏松地区早白垩世早期脉岩的 SiO_2 含

量为 73.68%~76.01%、 Al_2O_3 含量为 12.34%~13.12%、 MgO 含量为 0.01%~0.17% ($\text{Mg}^\# = 1.8 \sim 27.5$)、 Fe_2O_3 的含量为 0.89%~1.11%，富集 LREEs 和 LILEs，亏损 HREEs 和 HFSEs、Ti 等，表明石英二长斑岩和花岗斑岩应主要起源于下部陆壳的部分熔融。石英二长斑岩的 T_{DM2} 介于 1 920~2 560 Ma；花岗斑岩的 T_{DM2} 介于 1 878~2 202 Ma，表明石英二长斑岩和花岗斑岩的原始岩浆起源于古元古代下地壳的部分熔融。

早白垩世晚期岩株的岩石类型包括二长斑岩和花岗斑岩。通化赤柏松地区早白垩世晚期花岗斑岩的 SiO_2 含量为 70.35%~76.07%、 Al_2O_3 含量为 11.99%~12.15%、 MgO 含量为 0.09%~0.18% ($\text{Mg}^\# = 13.1 \sim 23.7$)、 Fe_2O_3 的含量为 1.15%~1.18%，富集 LREEs 和 LILEs，亏损 HREEs 和 HFSEs、P、Ti 等；二长斑岩的 SiO_2 含量为 60.61%、 Al_2O_3 含量为 16.13%、 MgO 含量为 2.48% ($\text{Mg}^\# = 44.9$)、 Fe_2O_3 的含量为 6.03%，富集 LREEs 和 LILEs，亏损 HREEs 和 HFSEs 等，P 和 Ti 的亏损程度相对花岗斑岩较低。二长斑岩和花岗斑岩的主微量元素特征与同时期壳源成因的四道沟组粗面安山岩和流纹岩相类似，具有明显的 Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 的亏损 (Yu *et al.*, 2009)，而与交代岩石圈地幔成因的三棵榆树组火山岩明显不同 (裴福萍等, 2009)。花岗斑岩的 T_{DM2} 介于 1 878~2 202 Ma，上述特征表明二长斑岩和花岗斑岩的原始岩浆起源于古元古代下地壳的部分熔融。同时，早白垩世晚期岩株中的二长斑岩具有相对较高的 $\text{Mg}^\#$ 值 (44.9)，这一特点与研究区内同时代四道沟组火山岩 (113 Ma) 的特点相似 (Yu *et al.*, 2009)，其 MgO 、 Fe_2O_3 以及 P、Ti 含量显著升高，暗示小岩株中存在少量幔源物质的涉入。

与早白垩世早期花岗斑岩不同，早白垩世晚期花岗斑岩的 A/CNK 值 > 1.2 ，这种过铝质的特征普遍被认为是沉积岩型源区的反映，即为 S 型花岗岩的标志。但过铝质—强过铝质花岗岩并不一定都是 S 型花岗岩 (Miller, 1985; Barbarin, 1996; Sylvester, 1998; 吴福元等, 2017)。当花岗质岩浆向高分异方向演化时，其最后结晶的花岗岩受围岩物质的影响越来越显著 (Rottura *et al.*, 1993; Lackey *et al.*, 2006)，也会造成 A/CNK 值过高的情况。同时这种较高的 A/CNK 数值可能同时来自于 I 型花岗岩浆的结晶分异作用，而小岩株中 CB3-3 样品具有较高

的 Nb/Ta 比值的特征也佐证了其演化程度较高。由于 A/CNK < 1.0 的角闪石和辉石的分离，使得残余岩浆的 A/CNK 数值较大，进而形成过铝质甚至强过铝质花岗岩。上述分析显示，本文的花岗质岩株经历了强烈的结晶分异作用，同时演化过程中经历了同化混染作用，这造成了样品具有变化较大的 A/CNK 值。同时，早白垩世晚期花岗斑岩中锆石的 Hf 同位素相对于早白垩世早期花岗斑岩变化较大，存在较低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值，这可能同样是由于在更为强烈的结晶分异过程中受到了更大程度的同化混染作用的原因。

通化赤柏松地区花岗质岩脉 (株) 中锆石具有较低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-21.84 \sim -10.74$)，锆石的二阶段模式年龄 T_{DM2} 均介于 1.86~2.56 Ga，对应的单阶段 Hf 模式年龄 T_{DM1} 为 1 382 Ma。 T_{DM2} 年龄的平均值为 2 055 Ma，该年龄明显小于华北克拉通内部壳源的酸性火山岩和花岗岩 (Zhang *et al.*, 2011; Ma *et al.*, 2016)，同时又明显老于兴蒙造山带中花岗岩全岩钨两阶段模式年龄 (500~1 300 Ma) (Wu *et al.*, 2000; 李竞妍等, 2014)。上述结果表明通化赤柏松地区下地壳组成以古元古代增生的物质为主，同时存在少量的新太古代古老的地壳物质，暗示该地区存在两期地壳增生事件，这与研究区前寒武纪岩石的分布情况相吻合，同时也与研究区地处古元古代辽吉造山带北部的构造位置相一致。自古生代以来，尤其是中生代，周围的板片向华北俯冲、汇聚 (Windley *et al.*, 2010)，使得华北克拉通南、北两侧分别经历了古亚洲洋构造域和古特提斯构造域的强烈改造或影响，经历了弧后拉张、碰撞挤压、碰撞后伸展等构造演化过程，在华北地块边缘深部岩石圈地幔和浅表的岩浆作用、改造变形、盆地演化，都有深刻的记录 (Zheng *et al.*, 2018)。本文对研究区内花岗质岩石的比较也进一步解释了通化地区北部乃至整个华北板块北部壳源花岗岩较年轻的全岩 Nd 同位素两阶段亏损地幔模式年龄 (中新元古代) 与北部兴蒙造山带古生代的构造演化有关，暗示华北板块北部古生代确实存在地壳增生作用 (Pei *et al.*, 2011a)。

4.3 通化赤柏松早白垩世花岗质岩石形成的动力学背景

根据本文的研究，同时结合前人的研究成果，通化地区早白垩世时期存在早白垩世早期与早白垩世晚期两期岩浆事件 (Chen *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2009; 裴福萍等, 2009; Pei *et al.*, 2011a, 2011b;

秦亚, 2013; 隋振民和陈跃军, 2012). 通化地区早白垩世早期侵入岩包括基性—超基性岩脉(岩墙或岩株)(Pei *et al.*, 2011b)、花岗质岩脉(株)和花岗质深成侵入体(花岗闪长岩—二长花岗岩—正长花岗岩和碱长花岗岩)(秦亚, 2013; Pei *et al.*, 2011a), 更有A型非造山花岗岩的出露(秦亚等, 2013), 显示出双峰式岩石组合特征(Pei *et al.*, 2011a, 2011b), 华北克拉通东部乃至中国东部早白垩世双峰式岩浆作用的出现是岩石圈减薄的具体体现. 同时暗示早白垩世时期, 华北克拉通东部岩石圈减薄达到了峰期, 在局部地方岩石圈减薄几乎达到了地壳的底部, 软流圈地幔和地壳近乎直接接触(Jahn *et al.*, 1999). 同时期火山岩由玄武质—玄武质粗面安山岩—粗面安山岩—英安岩组成, 具钙碱性演化趋势, 其原始岩浆起源于受流体/熔体交代的地幔楔的部分熔融, 但受到不同程度陆壳物质的混染(裴福萍等, 2009). 赤柏松早白垩世早期花岗质岩脉样品主体具有高SiO₂、富碱和高A/CNK值的特征, 在130~127 Ma之内, 岩石的碱性程度明显提高. 微量元素上, 轻重稀土比相对较小, 同时重稀土未见明显分馏, 在岩浆演化过程存在斜长石、碱性长石、磷灰石和钛铁矿的分离结晶作用(图8), Zr元素也低于A型花岗岩(Whalen *et al.*, 1987)(图9), 并显示较低的Zr/Hf比值(25.96~30.90), 上述特征暗示岩浆演化过程中存在强烈的分离结晶作用. 综上所述, 双峰式岩石组合、高分异花岗质岩石和A型花岗岩出现(吴福元等, 2017及其中引用文献), 暗示早白垩世早期通化地区应处于伸展背景.

早白垩世晚期吉南地区侵入岩的岩石组合为闪长岩—二长岩—碱长花岗岩(秦亚, 2013; Qin *et al.*, 2013), 同时区内火山岩由早白垩世早期的以玄武质粗面安山岩和粗面岩为主, 转变为以粗面安山岩—粗面岩—粗面英安岩为主, 岩石的碱性程度提高, 属于高钾钙碱性—钾玄岩系列(Chen *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2009; 裴福萍等, 2009; 隋振民和跃军, 2012). 赤柏松小岩株中二长斑岩样品具有较高的Mg[#]值, 暗示这一岩株的形成可能有幔源物质的贡献, 这与强烈的基性岩浆底侵作用有关(Yang *et al.*, 2006; 孙金凤和杨进辉, 2009). 相对于早白垩世早期, 早白垩世晚期受古太平洋板块的俯冲作用减弱, 岩浆活动相对较少, 岩石圈处于引张状态, 岩浆源区与早白垩世早期相比较深, 岩石碱性程度增强并有幔源岩浆的出现, 暗示强烈伸展背景的存在

(裴福萍等, 2009; 隋振民和陈跃军, 2012). 同时, 研究区南部辽东半岛地区同时代以伸展背景下A型花岗岩的就位以及变质核杂岩的产出为特征(Yang *et al.*, 2004, 2006, 2007; 杨进辉, 2008; Ma *et al.*, 2016). 早白垩世时期, 通化地区处于古太平洋板块西向俯冲背景下的陆内伸展环境, 从早白垩世早期到早白垩世晚期, 岩石圈伸展程度增强.

5 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 通化赤柏松地区早白垩世的花岗质岩脉(株)的形成时代分为早白垩世早期(124~130 Ma)和早白垩世晚期(116 Ma).

(2) 通化赤柏松地区花岗质岩脉(株)整体属于高钾钙碱性系列岩石, 演化过程中经历了强烈的结晶分异作用和围岩的同化混染作用. 它们主要来自地壳物质的部分熔融, 早白垩世晚期岩浆中有幔源物质的涉入. 研究区下地壳以古元古代时期新增生的下地壳为主, 并存在少量新太古代古老的地壳物质.

(3) 研究区早白垩世早期处于古太平洋板块俯冲作用下的陆内伸展背景, 至早白垩世晚期岩石圈伸展程度增强.

表格文件参考本刊官网: www.earth-science.net.

References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that do not Report 204Pb. *Chemical Geology*, 192(1/2): 59–79. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00195-X)
- Barbarin, B., 1996. Genesis of the Two Main Types of Peraluminous Granitoids. *Geology*, 24(4): 295–298. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)0240295:gottmt>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)0240295:gottmt>2.3.co;2)
- Bau, M., 1996. Controls on the Fractionation of Isovalent Trace Elements in Magmatic and Aqueous Systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and Lanthanide Tetrad Effect. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 323–333. <https://doi.org/10.1007/s004100050159>
- Chang, R.H., Li, W.M., Liu, Y.J., et al., 2017. Structural Properties and Kinematic Analysis of Lianshanguan Ductile Shear Zone in Northern Liao-Ji Rift Zone, Northeastern North China Craton. *Earth Science*, 42(12): 2193–2207(in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. J., Sun, C. L., Sun, Y. W., et al., 2008. Cretaceous Volcanic Events in Southeastern Jilin Province,

- China: Evidence from Single Zircon U-Pb Ages. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 82(6): 1194–1200. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2008.tb00721.x>
- Black, L. P., Kamo, S. L., Allen, C. M., et al., 2004. Improved 206Pb/238U Microprobe Geochronology by the Monitoring of a Trace-Element-Related Matrix Effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and Oxygen Isotope Documentation for a Series of Zircon Standards. *Chemical Geology*, 205(1/2): 115–140. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.01.003>
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892–897. <https://doi.org/10.1038/nature03162>
- Gao, S., Rudnick, R. L., Xu, W. L., et al., 2008. Recycling Deep Cratonic Lithosphere and Generation of Intraplate Magmatism in the North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 270(1/2): 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.03.008>
- Ge, W. C., Zhao, G. C., Sun, D. Y., et al., 2003. Metamorphic P-T Path of the Southern Jilin Complex: Implications for Tectonic Evolution of the Eastern Block of the North China Craton. *International Geology Review*, 45(11): 1029–1043. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.45.11.1029>
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012a. Improved in Situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391. <https://doi.org/10.1039/c2ja30078h>
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012b. A “Wire” Signal Smoothing Device for Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Analysis. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 78: 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2012.09.007>
- Irber, W., 1999. The Lanthanide Tetrad Effect and Its Correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of Evolving Peraluminous Granite Suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3/4): 489–508. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00027-7](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00027-7)
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Lo, C. H., et al., 1999. Crust-mantle Interaction Induced by Deep Subduction of the Continental Crust: Geochemical and Sr-Nd Isotopic Evidence from Post-Collisional Mafic-Ultramafic Intrusions of the Northern Dabie Complex, Central China. *Chemical Geology*, 157(1/2): 119–146. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(98\)00197-1](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(98)00197-1)
- Koschek, G., 1993. Origin and Significance of the SEM Cathodoluminescence from Zircon. *Journal of Microscopy*, 171(3): 223–232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.1993.tb03379.x>
- Lackey, J. S., Valley, J. W., Hinke, H. J., 2006. Deciphering the Source and Contamination History of Peraluminous Magmas Using $\delta^{18}\text{O}$ of Accessory Minerals: Examples from Garnet-Bearing Plutons of the Sierra Nevada Batholith. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(1): 20–44. <https://doi.org/10.1007/s00410-005-0043-6>
- Li, C. W., Guo, F., Zhao, L., et al., 2010. Geochemical Constraints on Petrogenesis of Late Mesozoic Intermediate-felsic Volcanic Rocks from the Southeastern Jilin Province, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1074–1088 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Guo, F., Li, C. W., et al., 2014. Neodymium Isotopic Variations of Late Paleozoic to Mesozoic I- and A-type Granitoids in NE China: Implications for Tectonic Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1995–2008 (in Chinese with English abstract).
- Lu, X. P., Wu, F. Y., Zhang, Y. B., et al., 2004. Emplacement Age and Tectonic Setting of the Paleoproterozoic Liaoji Granites in Tonghua Area, Southern Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 381–392 (in Chinese with English abstract).
- Lu, X. P., Wu, F. Y., Guo, J. H., et al., 2005. Late Paleoproterozoic Granitic Magmatism and Crustal Evolution in the Tonghua Region, Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 721–736. (in Chinese with English abstract).
- Ma, Q., Xu, Y. G., Zheng, J. P., et al., 2016. Coexisting Early Cretaceous High-Mg Andesites and Adakitic Rocks in the North China Craton: The Role of Water in Intraplate Magmatism and Cratonic Destruction. *Journal of Petrology*, 57(7): 1279–1308. <https://doi.org/10.1093/petrology/egw040>
- Masuda, A., Akagi, T., 1989. Lanthanide Tetrad Effect Observed in Leucogranites from China. *Geochemical Journal*, 23(5): 245–253. <https://doi.org/10.2343/geochemj.23.245>
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3/4): 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Miller, C. F., 1985. Are Strongly Peraluminous Magmas Derived from Pelitic Sedimentary Sources? *The Journal of Geology*, 93(6): 673–689. <https://doi.org/10.1086/628995>
- Monecke, T., Kempe, U., Trinkler, M., et al., 2011. Unusual Rare Earth Element Fractionation in a Tin-Bearing

- Magmatic-Hydrothermal System. *Geology*, 39(4): 295—298. <https://doi.org/10.1130/g31659.1>
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63—81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- Pei, F. P., Xu, W. L., Yang, D. B., et al., 2009. Heterogeneity of Late Mesozoic Deep Lithosphere beneath the Northeastern North China Craton: 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).
- Pei, F. P., Xu, W. L., Yang, D. B., et al., 2011a. Petrogenesis of Late Mesozoic Granitoids in Southern Jilin Province, Northeastern China: Geochronological, Geochemical, and Sr-Nd-Pb Isotopic Evidence. *Lithos*, 125(1/2): 27—39. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.01.004>
- Pei, F. P., Xu, W. L., Yang, D. B., et al., 2011b. Geochronology and Geochemistry of Mesozoic Mafic-Ultramafic Complexes in the Southern Liaoning and Southern Jilin Provinces, NE China: Constraints on the Spatial Extent of Destruction of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(2): 636—650. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2010.10.015>
- Preston, R. M. F., 1985. Rare Earth Element Geochemistry. *Earth-Science Reviews*, 22(3): 242—243. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(85\)90064-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(85)90064-9)
- Qin, Y., Liang, Y. H., Hu, Z. C., et al., 2013. Confirmation of Aluminous A-Type Granite Emplacement and Its Tectonic Significance during Early Cretaceous in the Laoling Area, South of Jilin Province. *Earth Science*, 38(4): 677—688 (in Chinese with English abstract).
- Rottura, A., Caggianelli, A., Campana, R., et al., 1993. Petrogenesis of Hercynian Peraluminous Granites from the Calabrian Arc, Italy. *European Journal of Mineralogy*, 5(4): 737—754. <https://doi.org/10.1127/ejm/5/4/0737>
- Santosh, M., 2010. Assembling North China Craton within the Columbia Supercontinent: The Role of Double-Sided Subduction. *Precambrian Research*, 178(1/2/3/4): 149—167. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.02.003>
- Sui, Z. M., Chen, Y. J., 2012. Petrogenesis of Volcanic Rocks from Jilin: Evidences from Zircon Sankeyushu Formation in Southern U-Pb Ages and Hf Isotopes. *Earth Science*, 26(4): 627—634 (in Chinese with English abstract).
- Sun, J. F., Yang, J. H., 2009. Early Cretaceous A-Type Granites in the Eastern North China Block with Relation to Destruction of the Craton. *Earth Science*, 34(1): 137—147 (in Chinese with English abstract).
- Sylvester, P. J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(1/2/3/4): 29—44. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00024-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00024-3)
- Tang, L., Santosh, M., Teng, X. M., 2015. Paleoproterozoic (ca. 2.1—2.0 Ga) Arc Magmatism in the Fuping Complex: Implications for the Tectonic Evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 268 (Supplement C): 16—32. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.07.001>
- Windley, B. F., Maruyama, S., Xiao, W. J., 2010. Delamination/thinning of Sub-Continental Lithospheric Mantle under Eastern China: The Role of Water and Multiple Subduction. *American Journal of Science*, 310(10): 1250—1293. <https://doi.org/10.2475/10.2010.03>
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407—419. <https://doi.org/10.1007/bf00402202>
- Wu, F. Y., Ge, W. C., Sun, D. Y., et al., 1997. The Sm-Nd, Rb-Sr Isotopic Ages of the Archean Granites in Southern Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 13(4): 499—506 (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. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(00\)00179-7](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(00)00179-7)
- Wu, F. Y., Yang, J. H., Liu, X. M., 2005. Geochronological Framework of the Mesozoic Granitic Magmatism in the Liaodong Peninsula, Northeast China. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 305—317 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F., Lin, J., Wilde, S., et al., 2005a. Nature and Significance of the Early Cretaceous Giant Igneous Event in Eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1/2): 103—119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.019>
- Wu, F. Y., Yang, J. H., Wilde, S. A., et al., 2005b. Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Implications of Jurassic Granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chemical Geology*, 221(1/2): 127—156. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.04.010>
- Wu, F. Y., Liu, X. C., Ji, W. Q., et al., 2017. Highly Fractionated Granites: Recognition and Research. *Science China-Earth Sciences*, 60(7): 1201—1219. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5139-1>
- Xu, W. L., Gao, S., Wang, Q. H., et al., 2006. Mesozoic Crustal Thickening of the Eastern North China Craton:

- Evidence from Eclogite Xenoliths and Petrologic Implications. *Geology*, 34(9): 721–724. <https://doi.org/10.1130/g22551.1>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.04.003>
- Xu, Y. G., 2007. Diachronous Lithospheric Thinning of the North China Craton and Formation of the Daxin'anling-Taihangshan Gravity Lineament. *Lithos*, 96(1/2): 281–298. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.09.013>
- Xu, Y. G., Blusztajn, J., Ma, J. L., et al., 2008. Late Archean to Early Proterozoic Lithospheric Mantle beneath the Western North China Craton: Sr-Nd-Os Isotopes of Peridotite Xenoliths from Yangyuan and Fansi. *Lithos*, 102(1/2): 25–42. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.04.005>
- Yang, F. C., Song, Y. H., Zhao, Y. Y., 2017. Zircon SHRIMP U-Pb Age and Hf Isotope of Granite in Panling Ore Concentration Area in Liaoning and Its Geological Significance. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 47(5): 1429–1441(in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2004. Multiple Sources for the Origin of Granites: Geochemical and Nd/Sr Isotopic Evidence from the Gudaoling Granite and Its Mafic Enclaves, Northeast China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(21): 4469–4483. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.04.015>
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2006. A Hybrid Origin for the Qianshan A-Type Granite, Northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Evidence. *Lithos*, 89(1/2): 89–106. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.10.002>
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2007. Rapid Exhumation and Cooling of the Liaonan Metamorphic Core Complex: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Thermochronology and Implications for Late Mesozoic Extension in the Eastern North China Craton. *Geological Society of America Bulletin*, 119(11/12): 1405–1414. <https://doi.org/10.1130/b26085.1>
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2008. The Extensional Geodynamic Setting of Early Cretaceous Granitic Intrusions in the Eastern North China Craton: Evidence from Laser Ablation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of K-Bearing Minerals. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1175–1184(in Chinese with English abstract).
- Yang, Q. Y., Santosh, M., 2015. Paleoproterozoic Arc Magmatism in the North China Craton: No Siderian Global Plate Tectonic Shutdown. *Gondwana Research*, 28(1): 82–105. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.08.005>
- Yu, Y., Xu, W. L., Pei, F. P., et al., 2009. Chronology and Geochemistry of Mesozoic Volcanic Rocks in the Linjiang Area, Jilin Province and Their Tectonic Implications. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 83(2): 245–257. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2009.00039.x>
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.2004.tb00755.x>
- Zhai, M. G., Santosh, M., 2011. The Early Precambrian Odyssey of the North China Craton: a Synoptic Overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6–25. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.02.005>
- Zhang, H. F., Ying, J. F., Tang, Y. J., et al., 2011. Phanerozoic Reactivation of the Archean North China Craton through Episodic Magmatism: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes from the Liaodong Peninsula. *Gondwana Research*, 19(2): 446–459. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.09.002>
- Zhang, Y., Xing, S. W., Wang, Y., et al., 2014. Palaeoproterozoic Chibaisong Mafic Intrusion and Mineralization (Northeast China), the Oldest Cu-Ni Sulphide Deposit in China: Evidence from Re-Os Dating of Pyrrhotite. *International Geology Review*, 56(14): 1783–1791. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.956818>
- Zhang, Y., Xing, S. W., Song, Q. H., et al., 2015. Re-Os and U-Pb Geochronology of Porphyry and Skarn Types Copper Deposits in Jilin Province, NE China. *Resource Geology*, 65(4): 394–404. <https://doi.org/10.1111/rge.12074>
- Zhang, Y., Xing, S. W., Wang, Y., et al., 2018. Geochronological and Geochemical Constraints on the Genesis of the Huanren Skarn Cu-Zn Deposit, Northeast China. *Ore Geology Reviews*, 92: 366–378. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.11.031>
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 2001. Archean Blocks and Their Boundaries in the North China Craton: Lithological, Geochemical, Structural and P-T Path Constraints and Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 107(1/2): 45–73. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(00\)00154-6](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(00)00154-6)
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key

- Issues Revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177—202. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.10.002>
- Zhao, G. C., Zhai, M. G., 2013. Lithotectonic Elements of Precambrian Basement in the North China Craton: Review and Tectonic Implications. *Gondwana Research*, 23(4): 1207—1240. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.08.016>
- Zheng, J. P., Dai, H. K., 2018. Subduction and Retreating of the Western Pacific Plate Resulted in Lithospheric Mantle Replacement and Coupled Basin-Mountain Respond in the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 61(4): 406—424. <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9166-8>
- Zheng, J., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2006. Mineral Chemistry of Peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic Lithosphere: Constraints on Mantle Evolution beneath Eastern China. *Journal of Petrology*, 47(11): 2233—2256. <https://doi.org/10.1093/petrology/egl042>
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2007. Mechanism and Timing of Lithospheric Modification and Replacement beneath the Eastern North China Craton: Peridotitic Xenoliths from the 100 Ma Fuxin Basalts and a Regional Synthesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(21): 5203—5225. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.07.028>
- 附中文参考文献**
- 常瑞虹, 李伟民, 刘永江, 等, 2017. 辽吉裂谷带北缘连山关韧性剪切带的构造属性和运动学分析. *地球科学*, 42(12): 2193—2207.
- 李超文, 郭锋, 赵亮, 等, 2010. 吉林东南部晚中生代中酸性火山作用成因的地球化学制约. *岩石学报*, 26(4): 1074—1088.
- 李竞妍, 郭锋, 李超文, 等, 2014. 东北地区晚古生代—中生代I型和A型花岗岩Nd同位素变化趋势及其构造意义. *岩石学报*, 30(7): 1995—2008.
- 路孝平, 吴福元, 张艳斌, 等, 2004. 吉林南部通化地区古元古代辽吉花岗岩的侵位年代与形成构造背景. *岩石学报*, 20(3): 381—392.
- 路孝平, 吴福元, 郭敬辉, 等, 2005. 通化地区古元古代晚期花岗质岩浆作用与地壳演化. *岩石学报*, 21(3): 721—736.
- 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.
- 秦亚, 梁一鸿, 胡兆初, 等, 2013. 吉南老岭地区早白垩世铝质A型花岗岩的厘定及其构造意义. *地球科学*, 38(4): 677—688.
- 隋振民, 陈跃军, 2012. 吉林南部三棵榆树组火山岩的成因: 锆石U-Pb年龄和Hf同位素证据. *现代地质*, 26(4): 627—634.
- 孙金凤, 杨进辉, 2009. 华北东部早白垩世A型花岗岩与克拉通破坏. *地球科学*, 34(1): 137—147.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等, 1997. 吉林南部太古代花岗岩Sm-Nd, Rb-Sr同位素年龄测定. *岩石学报*, 13(4): 499—506.
- 吴福元, 杨进辉, 柳小明, 2005. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架. *高校地质学报*, 11(3): 305—317.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 王佳敏, 杨雷, 2017. 高分异花岗岩的识别与研究. *中国科学:地球科学* 47(7): 745—765.
- 杨凤超, 宋运红, 赵玉岩, 2017. 辽宁盘岭矿集区花岗岩锆石SHRIMP U-Pb年龄、Hf同位素组成及地质意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 47(5): 1429—1441.
- 杨进辉, 吴福元, 钟孙霖, 等, 2008. 华北东部早白垩世花岗岩侵位的伸展地球动力学背景: 激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学证据. *岩石学报*, 24(6): 1175—1184.

1 表 1 通化赤柏松地区早白垩世花岗质岩石中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

2 Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results for the early Cretaceous granitoids of the Chibaisong area in Tonghua

样品号	Th (ppm)	U (ppm)	Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
CB3-2-01	480	587	0.82	0.06490	0.00567	0.15494	0.01293	0.01731	0.00045	771	191	146	11	111	3
CB3-2-02	494	255	1.94	0.08202	0.01185	0.20374	0.02861	0.01802	0.00061	1246	301	188	24	115	4
CB3-2-03	686	850	0.81	0.05390	0.00158	0.12442	0.00346	0.01676	0.00034	367	30	119	3	107	2
CB3-2-04	320	210	1.52	0.07250	0.02070	0.17976	0.05028	0.01798	0.00103	1000	608	168	43	115	7
CB3-2-05	863	676	1.28	0.04970	0.00300	0.11477	0.00663	0.01676	0.00043	181	87	110	6	107	3
CB3-2-06	561	516	1.09	0.09246	0.00628	0.23193	0.01474	0.01819	0.00044	1477	133	212	12	116	3
CB3-2-07	451	734	0.61	0.06016	0.00859	0.15691	0.02173	0.01892	0.00066	609	324	148	19	121	4
CB3-2-08	534	759	0.70	0.06330	0.00637	0.13992	0.01362	0.01603	0.00041	718	223	133	12	103	3
CB3-2-09	251	256	0.98	0.04605	0.00551	0.11969	0.01381	0.01885	0.00060		238	115	13	120	4
CB3-2-10	483	383	1.26	0.08834	0.01074	0.21424	0.02518	0.01759	0.00055	1390	245	197	21	112	3
CB3-2-11	664	750	0.89	0.06554	0.00451	0.16854	0.01095	0.01865	0.00056	792	86	158	10	119	4
CB3-2-12	556	410	1.36	0.06056	0.00340	0.16009	0.00855	0.01917	0.00049	624	71	151	7	122	3
CB3-2-13	1110	845	1.31	0.06159	0.00676	0.14797	0.01575	0.01742	0.00046	660	246	140	14	111	3
CB3-2-14	489	606	0.81	0.05435	0.00501	0.13517	0.01201	0.01804	0.00045	386	211	129	11	115	3
CB3-2-15	393	413	0.95	0.05500	0.00819	0.14419	0.02104	0.01901	0.00057	412	334	137	19	121	4
CB3-2-16	165	178	0.93	0.06848	0.01349	0.16706	0.03202	0.01769	0.00080	883	440	157	28	113	5
CB3-2-17	283	277	1.02	0.08140	0.01112	0.21476	0.02830	0.01913	0.00069	1231	284	198	24	122	4
CB3-2-18	733	445	1.65	0.06303	0.01084	0.16754	0.02815	0.01928	0.00070	709	385	157	24	123	4
CB3-2-19	438	509	0.86	0.04894	0.00667	0.12302	0.01636	0.01823	0.00055	145	278	118	15	116	3
CB3-2-20	395	540	0.73	0.05133	0.00684	0.13435	0.01735	0.01898	0.00062	255	288	128	16	121	4
CB3-2-21	548	742	0.74	0.04605	0.00424	0.10908	0.00953	0.01718	0.00050		199	105	9	110	3
CB3-2-22	601	856	0.70	0.05665	0.00354	0.14953	0.00873	0.01914	0.00042	478	142	141	8	122	3

CB3-2-23	369	228	1.62	0.06128	0.00715	0.16732	0.01902	0.01980	0.00052	649	262	157	17	126	3
CB3-2-24	142	116	1.22	0.05191	0.00698	0.13871	0.01825	0.01938	0.00054	281	294	132	16	124	3
CB3-2-25	713	940	0.76	0.05639	0.00393	0.14938	0.00983	0.01921	0.00044	468	159	141	9	123	3
CB7-2-01	553	825	0.67	0.04605	0.00522	0.12495	0.01347	0.01968	0.00069		225	120	12	126	4
CB7-2-02	616	709	0.87	0.05885	0.00331	0.16248	0.00869	0.02002	0.00054	562	70	153	8	128	3
CB7-2-03	617	784	0.79	0.05400	0.00431	0.14710	0.01119	0.01976	0.00063	371	114	139	10	126	4
CB7-2-04	889	825	1.08	0.06334	0.00472	0.17572	0.01237	0.02012	0.00065	720	95	164	11	128	4
CB7-2-05	431	364	1.19	0.04605	0.01172	0.12502	0.03143	0.01969	0.00077		416	120	28	126	5
CB7-2-06	597	659	0.91	0.04993	0.00361	0.13586	0.00940	0.01973	0.00058	192	104	129	8	126	4
CB7-2-07	779	977	0.80	0.05810	0.00788	0.15895	0.02089	0.01984	0.00067	533	309	150	18	127	4
CB7-2-08	934	1155	0.81	0.06325	0.00852	0.17528	0.02281	0.02010	0.00070	717	301	164	20	128	4
CB7-2-09	673	853	0.79	0.07638	0.01108	0.21749	0.03064	0.02065	0.00072	1105	309	200	26	132	5
CB7-2-10	1118	1196	0.93	0.07679	0.00781	0.22004	0.02152	0.02078	0.00058	1116	211	202	18	133	4
CB7-2-11	1516	1501	1.01	0.04783	0.00159	0.12951	0.00414	0.01964	0.00043	91	38	124	4	125	3
CB7-2-12	90	112	0.80	0.04605	0.02933	0.12430	0.07791	0.01958	0.00223		998	119	70	125	14
CB7-2-13	233	371	0.63	0.06095	0.00889	0.16752	0.02374	0.01993	0.00069	638	330	157	21	127	4
CB7-2-14	827	852	0.97	0.06973	0.01928	0.19639	0.05310	0.02043	0.00119	920	587	182	45	130	7
CB7-2-15	943	1127	0.84	0.05569	0.00792	0.15090	0.02084	0.01965	0.00066	440	322	143	18	125	4
CB7-2-16	438	645	0.68	0.06858	0.00782	0.18887	0.02022	0.01998	0.00089	886	148	176	17	128	6
CB7-2-17	585	756	0.77	0.04792	0.00662	0.12779	0.01689	0.01935	0.00088	95	207	122	15	124	6
CB7-2-18	686	827	0.83	0.06512	0.01039	0.17900	0.02762	0.01994	0.00081	778	358	167	24	127	5
CB7-2-19	60	68	0.88	0.06120	0.02040	0.16881	0.05516	0.02000	0.00131	646	654	158	48	128	8
CB7-2-20	233	327	0.71	0.09964	0.03003	0.27252	0.08014	0.01984	0.00131	1617	656	245	64	127	8
CB7-2-21	317	407	0.78	0.07045	0.00526	0.19409	0.01369	0.01999	0.00064	941	92	180	12	128	4
CB7-2-22	804	1002	0.80	0.06150	0.00659	0.16871	0.01710	0.01991	0.00080	657	149	158	15	127	5
CB7-2-23	1027	1078	0.95	0.05381	0.00954	0.14637	0.02526	0.01973	0.00079	363	362	139	22	126	5

CB7-2-24	1035	1060	0.98	0.04755	0.00656	0.12897	0.01733	0.01967	0.00061	77	271	123	16	126	4
CB7-2-25	212	214	0.99	0.05303	0.00631	0.14482	0.01670	0.01981	0.00058	330	268	137	15	126	4
CB7-2-26	431	813	0.53	0.06316	0.01495	0.17483	0.03933	0.02009	0.00156	714	358	164	34	128	10
CB8-2-01	194	263	0.74	0.04877	0.00551	0.14151	0.01540	0.02105	0.00065	137	244	134	14	134	4
CB8-2-02	469	549	0.85	0.05295	0.00376	0.15514	0.01052	0.02134	0.00065	327	99	146	9	136	4
CB8-2-03	624	879	0.71	0.05003	0.00270	0.14599	0.00755	0.02125	0.00056	196	72	138	7	136	4
CB8-2-04	462	677	0.68	0.05696	0.00164	0.16580	0.00457	0.02119	0.00047	490	28	156	4	135	3
CB8-2-05	423	365	1.16	0.06382	0.00551	0.18559	0.01530	0.02109	0.00054	736	189	173	13	135	3
CB8-2-06	400	645	0.62	0.04605	0.00244	0.13379	0.00639	0.02107	0.00049		115	128	6	134	3
CB8-2-07	858	813	1.06	0.04910	0.00267	0.14291	0.00745	0.02118	0.00055	153	74	136	7	135	3
CB8-2-08	328	474	0.69	0.05003	0.00436	0.14135	0.01179	0.02049	0.00051	196	198	134	10	131	3
CB8-2-09	747	916	0.82	0.05404	0.00367	0.15656	0.01001	0.02101	0.00048	373	157	148	9	134	3
CB8-2-10	880	694	1.27	0.08140	0.00302	0.23677	0.00819	0.02116	0.00052	1231	33	216	7	135	3
CB8-2-11	479	776	0.62	0.05559	0.00115	0.15275	0.00304	0.01997	0.00041	436	21	144	3	127	3
CB8-2-12	334	409	0.82	0.05220	0.00707	0.14301	0.01889	0.01987	0.00060	294	300	136	17	127	4
CB8-2-13	501	736	0.68	0.05427	0.00443	0.15043	0.01177	0.02010	0.00047	382	188	142	10	128	3
CB8-2-14	662	536	1.23	0.05893	0.00277	0.17173	0.00769	0.02118	0.00052	565	56	161	7	135	3
CB8-2-15	38	51	0.74	0.06060	0.01539	0.17529	0.04360	0.02098	0.00108	625	507	164	38	134	7
CB8-2-16	301	304	0.99	0.05625	0.00276	0.16269	0.00767	0.02101	0.00051	462	62	153	7	134	3
CB8-2-17	162	246	0.66	0.06027	0.00304	0.17653	0.00853	0.02128	0.00052	613	63	165	7	136	3
CB8-2-18	463	645	0.72	0.05665	0.00386	0.15753	0.01013	0.02017	0.00046	478	155	149	9	129	3
CB8-2-19	354	428	0.83	0.05288	0.00305	0.14337	0.00792	0.01969	0.00051	324	79	136	7	126	3
CB8-2-20	194	205	0.95	0.04884	0.00572	0.14281	0.01610	0.02124	0.00081	140	181	136	14	135	5
CB8-2-21	566	698	0.81	0.05788	0.00368	0.15144	0.00904	0.01898	0.00042	525	144	143	8	121	3
CB8-2-22	756	1037	0.73	0.04998	0.00273	0.13163	0.00688	0.01912	0.00048	194	75	126	6	122	3
CB8-2-23	439	727	0.60	0.04785	0.00164	0.12782	0.00419	0.01939	0.00041	92	40	122	4	124	3

CB8-2-24	449	385	1.17	0.06025	0.00378	0.16570	0.00987	0.01997	0.00055	613	81	156	9	127	3
CB8-2-25	289	235	1.23	0.05250	0.00366	0.14113	0.00944	0.01951	0.00053	307	103	134	8	125	3
CB8-2-26	952	1115	0.85	0.04889	0.00184	0.12825	0.00461	0.01904	0.00041	143	46	123	4	122	3
CB31-5-01	288	394	0.73	0.05165	0.00238	0.13420	0.00563	0.01912	0.00025	270	72	128	5	122	2
CB31-5-02	1527	1618	0.94	0.05059	0.00129	0.13659	0.00369	0.01950	0.00020	222	43	130	3	124	1
CB31-5-03	108	122	0.88	0.06048	0.00478	0.16027	0.01229	0.01950	0.00039	621	131	151	11	124	2
CB31-5-04	562	393	1.43	0.04895	0.00469	0.12849	0.01145	0.01927	0.00047	146	154	123	10	123	3
CB31-5-05	258	201	1.29	0.05188	0.00359	0.13330	0.00831	0.01909	0.00034	280	110	127	7	122	2
CB31-5-06	244	397	0.61	0.05477	0.00604	0.14996	0.01852	0.01928	0.00045	403	236	142	16	123	3
CB31-5-07	1422	1698	0.84	0.05744	0.00157	0.15713	0.00424	0.01980	0.00022	508	40	148	4	126	1
CB31-5-08	696	735	0.95	0.05864	0.00253	0.16148	0.00708	0.01989	0.00029	554	70	152	6	127	2
CB31-5-09	263	469	0.56	0.05046	0.00257	0.13402	0.00646	0.01935	0.00024	216	89	128	6	124	2
CB31-5-10	562	497	1.13	0.04784	0.00228	0.12920	0.00619	0.01953	0.00029	91	79	123	6	125	2
CB31-5-11	415	445	0.93	0.05032	0.00278	0.13459	0.00755	0.01935	0.00029	210	102	128	7	124	2
CB31-5-12	253	308	0.82	0.05039	0.00247	0.13417	0.00644	0.01938	0.00026	213	86	128	6	124	2
CB31-5-13	540	591	0.91	0.05165	0.00186	0.13723	0.00490	0.01921	0.00022	270	61	131	4	123	1
CB31-5-14	675	578	1.17	0.04874	0.00176	0.13043	0.00453	0.01942	0.00023	135	59	124	4	124	1
CB31-5-15	241	281	1.58	0.05145	0.00308	0.13712	0.00811	0.01932	0.00036	261	102	130	7	123	2
CB31-5-16	366	363	1.01	0.04558	0.00224	0.12125	0.00574	0.01939	0.00024	-24	76	116	5	124	2
CB31-5-17	789	521	1.51	0.05868	0.00231	0.15758	0.00590	0.01949	0.00021	555	63	149	5	124	1
CB31-5-18	255	248	1.03	0.07514	0.02134	0.19156	0.04822	0.01915	0.00032	1072	518	178	41	122	2
CB31-5-19	387	310	1.63	0.04803	0.00278	0.12986	0.00747	0.01955	0.00027	101	103	124	7	125	2
CB31-5-20	510	896	0.57	0.05004	0.00222	0.13715	0.00600	0.01980	0.00018	197	85	130	5	126	1
CB31-5-21	141	143	0.98	0.05177	0.00359	0.13545	0.00916	0.01931	0.00032	275	125	129	8	123	2

4 表2 通化赤柏松早白垩世花岗质岩石主量元素 (wt. %) 和微量元素 (ppm) 分析结果
5 Table 2 Major (wt. %) and trace (ppm) element data of the early Cretaceous granitoids of the Chibaisong
6 area in Tonghua.

样品	CB3-2	CB3-3	CB3-4	CB7-2	CB7-3	CB8-2
岩石类型	花岗斑岩	二长斑岩	花岗斑岩	石英二长斑岩	花岗斑岩	正长斑岩
SiO ₂	76.07	60.61	70.35	76.01	75.77	73.68
TiO ₂	0.12	0.62	0.14	0.09	0.10	0.13
Al ₂ O ₃	11.99	16.13	12.15	12.34	12.47	13.12
Fe ₂ O ₃ ^t	1.15	6.03	1.18	0.89	1.11	1.10
MnO	0.02	0.09	0.02	0.01	0.02	0.03
MgO	0.18	2.48	0.09	0.17	0.02	0.01
CaO	1.35	3.83	0.11	0.14	0.12	0.59
Na ₂ O	0.87	4.21	1.35	4.72	3.59	4.47
K ₂ O	5.39	3.46	6.42	4.43	4.95	3.65
P ₂ O ₅	0.02	0.53	0.03	0.03	0.01	0.03
LOI	2.68	1.89	7.78	1.12	1.73	3.01
Total	99.68	99.77	99.04	99.86	99.78	99.63
Na ₂ O+K ₂ O	6.26	7.67	7.77	9.14	8.54	8.12
Na ₂ O/K ₂ O	0.16	1.22	0.21	1.07	0.73	1.23
A/CNK	1.23	0.91	1.33	0.96	1.09	1.06
Mg#	23.7	44.9	13.1	27.5	3.45	1.77
Cr	0.43	0.70	1.02	1.09	0.71	0.66
Ni	0.36	1.07	0.67	0.56	0.42	1.28
Sc	1.43	2.20	1.84	1.56	1.44	1.91
Co	0.63	0.97	0.82	0.44	0.30	0.98
V	3.02	5.34	3.77	2.23	2.95	4.95
Cu	1.78	3.24	3.88	4.90	3.61	2.97
Zn	50.4	59.6	41.4	24.4	30.9	18.8
Ga	15.8	16.4	17.6	16.6	20.1	17.5
Ba	342	449	264	109	132	233
Rb	191	219	193	132	173	106
Th	17.3	16.5	17.4	16.9	16.5	14.6
U	2.24	2.75	1.87	3.28	4.43	2.78
Nb	28.3	28.0	30.4	30.9	55.6	24.5
Ta	1.97	1.86	2.10	2.13	2.95	1.60
Sr	108	91.3	69.1	54.2	57.0	95.1
Zr	124	165	138	128	212	146
Hf	4.48	5.34	5.06	4.93	7.83	5.03
Y	23.9	22.8	26.1	20.5	41.2	22.0
Pb	18.1	14.3	14.9	15.9	11.3	7.80
La	41.7	43.0	51.0	5.02	35.1	36.3
Ce	71.8	83.6	73.7	49.5	86.7	53.0
Pr	8.10	8.46	10.8	1.36	7.96	6.55

Nd	26.7	27.2	35.7	4.67	26.8	21.6
Sm	4.85	4.65	6.40	1.22	5.39	3.76
Eu	0.29	0.40	0.32	0.06	0.09	0.35
Gd	4.16	3.62	5.34	1.52	5.28	3.35
Tb	0.64	0.58	0.78	0.38	1.00	0.51
Dy	3.84	3.70	4.52	2.94	6.74	3.26
Ho	0.79	0.79	0.89	0.71	1.48	0.71
Er	2.19	2.22	2.41	2.15	4.07	1.98
Tm	0.35	0.38	0.38	0.38	0.70	0.34
Yb	2.43	2.35	2.50	2.49	4.34	2.26
Lu	0.37	0.37	0.41	0.39	0.66	0.35
Σ REE	192	204	221	93.3	228	156
(La/Yb) _N	11.6	12.3	13.7	1.36	5.45	10.8
Eu/Eu*	0.19	0.29	0.16	0.14	0.05	0.30

Note: A/CNK = molar[Al₂O₃]/(CaO+Na₂O+K₂O); ; (La/Yb)_N = (La/0.310)/(Yb/0.209); Eu/Eu* = {(Eu/0.0735)/[(Sm/0.1950)+(Gd/0.259)]/2}

表 3 通化赤柏松花岗质岩石锆石 Hf 同位素测试结果

Table 3 Zircon Hf isotope data of the early Cretaceous granitoids of the Chibaisong area in Tonghua.

样品号	年龄(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM1} (Ma)	T_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
CB3-2-01	111	0.074475	0.002435	0.282155	0.000015	-18.38	0.53	1563	2336	-0.93
CB3-2-02	115	0.112163	0.003969	0.282223	0.000015	-16.10	0.51	1530	2192	-0.88
CB3-2-03	107	0.055291	0.001996	0.282088	0.000011	-20.69	0.40	1640	2481	-0.94
CB3-2-04	115	0.091286	0.003193	0.282148	0.000016	-18.67	0.57	1607	2354	-0.90
CB3-2-05	107	0.074227	0.002736	0.282266	0.000014	-14.46	0.48	1414	2090	-0.92
CB3-2-06	116	0.063632	0.002260	0.282278	0.000014	-13.99	0.48	1378	2060	-0.93
CB3-2-07	121	0.060106	0.002196	0.282304	0.000012	-13.06	0.43	1338	2002	-0.93
CB3-2-08	103	0.087329	0.003110	0.282172	0.000014	-17.82	0.50	1568	2301	-0.91
CB3-2-09	120	0.067852	0.002343	0.282277	0.000014	-14.04	0.50	1383	2063	-0.93
CB3-2-10	112	0.118831	0.003928	0.282302	0.000020	-13.30	0.69	1408	2016	-0.88
CB3-2-11	119	0.078044	0.002823	0.282331	0.000015	-12.18	0.55	1322	1946	-0.91
CB3-2-12	122	0.049345	0.001772	0.282269	0.000016	-14.28	0.57	1373	2079	-0.95
CB3-2-13	111	0.170525	0.005231	0.282351	0.000020	-11.65	0.71	1385	1912	-0.84
CB3-2-14	115	0.055243	0.002016	0.282282	0.000016	-13.86	0.57	1364	2052	-0.94
CB3-2-15	121	0.067212	0.002330	0.282250	0.000017	-14.98	0.60	1421	2123	-0.93
CB3-2-16	113	0.030850	0.001123	0.282368	0.000016	-10.74	0.55	1211	1856	-0.97
CB3-2-17	122	0.057948	0.002076	0.282277	0.000014	-14.02	0.48	1373	2062	-0.94
CB3-2-18	123	0.136361	0.004680	0.282333	0.000016	-12.24	0.57	1390	1949	-0.86
CB3-2-19	116	0.067892	0.002383	0.282267	0.000013	-14.40	0.47	1399	2086	-0.93
CB3-2-20	121	0.055165	0.001978	0.282267	0.000011	-14.38	0.41	1384	2085	-0.94
CB3-2-21	110	0.076748	0.002625	0.282307	0.000011	-13.02	0.40	1350	1999	-0.92
CB3-2-22	122	0.049549	0.001740	0.282273	0.000011	-14.13	0.39	1366	2069	-0.95

CB3-2-23	126	0.075865	0.002576	0.282274	0.000014	-14.18	0.49	1397	2072	-0.92
CB3-2-24	124	0.059146	0.002208	0.282291	0.000014	-13.54	0.48	1358	2032	-0.93
CB3-2-25	123	0.094649	0.003201	0.282320	0.000012	-12.60	0.41	1353	1972	-0.90
CB7-2-01	126	0.076065	0.002458	0.282316	0.000014	-12.50	0.49	1331	1973	-0.93
CB7-2-02	128	0.047339	0.001521	0.282255	0.000015	-14.58	0.52	1384	2105	-0.95
CB7-2-03	126	0.064128	0.002121	0.282319	0.000018	-12.35	0.65	1314	1964	-0.94
CB7-2-04	128	0.103428	0.003253	0.282310	0.000018	-12.76	0.65	1369	1989	-0.90
CB7-2-05	126	0.095148	0.003047	0.282329	0.000019	-12.08	0.68	1333	1946	-0.91
CB7-2-06	126	0.074712	0.002413	0.282328	0.000017	-12.05	0.60	1311	1944	-0.93
CB7-2-07	127	0.065799	0.002150	0.282265	0.000017	-14.28	0.61	1393	2085	-0.94
CB7-2-08	128	0.079149	0.002540	0.282312	0.000014	-12.65	0.48	1340	1983	-0.92
CB7-2-09	132	0.052611	0.001699	0.282298	0.000013	-13.06	0.46	1329	2009	-0.95
CB7-2-10	133	0.090848	0.002889	0.282297	0.000014	-13.19	0.48	1374	2016	-0.91
CB7-2-11	125	0.093830	0.002994	0.282310	0.000016	-12.76	0.57	1360	1989	-0.91
CB7-2-12	125	0.042613	0.001460	0.282049	0.000016	-21.84	0.58	1671	2560	-0.96
CB7-2-13	127	0.056159	0.001991	0.282133	0.000025	-18.94	0.88	1576	2378	-0.94
CB7-2-14	130	0.119646	0.003761	0.282301	0.000019	-13.14	0.68	1403	2013	-0.89
CB7-2-15	125	0.114522	0.003681	0.282324	0.000016	-12.32	0.57	1365	1961	-0.89
CB7-2-16	128	0.081591	0.002646	0.282292	0.000016	-13.35	0.58	1372	2026	-0.92
CB7-2-17	124	0.076840	0.002515	0.282328	0.000015	-12.07	0.54	1315	1946	-0.92
CB7-2-18	127	0.058437	0.001876	0.282271	0.000016	-14.04	0.55	1374	2071	-0.94
CB7-2-19	128	0.048275	0.001589	0.282324	0.000020	-12.15	0.69	1289	1951	-0.95
CB7-2-20	127	0.066399	0.002286	0.282172	0.000022	-17.55	0.78	1532	2291	-0.93
CB7-2-21	128	0.044687	0.001465	0.282307	0.000018	-12.74	0.63	1308	1988	-0.96
CB7-2-22	127	0.084412	0.002714	0.282274	0.000016	-14.00	0.55	1401	2067	-0.92
CB7-2-23	126	0.088471	0.002826	0.282305	0.000018	-12.91	0.65	1360	1998	-0.91

CB7-2-24	126	0.117662	0.003668	0.282327	0.000015	-12.21	0.54	1360	1954	-0.89
CB7-2-25	126	0.067247	0.002216	0.282339	0.000026	-11.66	0.93	1289	1920	-0.93
CB7-2-26	128	0.036572	0.001178	0.282313	0.000018	-12.49	0.63	1290	1973	-0.96
CB8-2-01	134	0.052824	0.001826	0.282246	0.000012	-14.84	0.42	1408	2123	-0.95
CB8-2-02	136	0.053447	0.001803	0.282296	0.000011	-13.09	0.41	1336	2013	-0.95
CB8-2-03	136	0.058841	0.001970	0.282296	0.000012	-13.10	0.41	1342	2013	-0.94
CB8-2-04	135	0.053451	0.001805	0.282263	0.000012	-14.24	0.42	1383	2085	-0.95
CB8-2-05	135	0.067976	0.002265	0.282310	0.000013	-12.62	0.45	1332	1983	-0.93
CB8-2-06	134	0.048410	0.001629	0.282249	0.000010	-14.71	0.35	1395	2115	-0.95
CB8-2-07	135	0.087191	0.002879	0.282283	0.000014	-13.61	0.48	1394	2045	-0.91
CB8-2-08	131	0.051171	0.001708	0.282281	0.000016	-13.59	0.56	1353	2044	-0.95
CB8-2-09	134	0.061697	0.002026	0.282265	0.000012	-14.20	0.42	1388	2083	-0.94
CB8-2-10	135	0.086531	0.002790	0.282277	0.000013	-13.84	0.46	1400	2060	-0.92
CB8-2-11	127	0.056518	0.001876	0.282286	0.000010	-13.45	0.35	1353	2036	-0.94
CB8-2-12	127	0.062641	0.002125	0.282280	0.000013	-13.67	0.47	1370	2049	-0.94
CB8-2-13	128	0.072191	0.002504	0.282289	0.000012	-13.37	0.41	1371	2030	-0.92
CB8-2-14	135	0.074500	0.002438	0.282298	0.000012	-13.06	0.43	1356	2011	-0.93
CB8-2-15	134	0.036401	0.001286	0.282355	0.000016	-10.94	0.56	1234	1878	-0.96
CB8-2-16	134	0.067874	0.002240	0.282286	0.000013	-13.48	0.48	1366	2037	-0.93
CB8-2-17	136	0.041984	0.001424	0.282210	0.000012	-16.09	0.44	1444	2202	-0.96
CB8-2-18	129	0.078291	0.002627	0.282304	0.000011	-12.86	0.38	1354	1998	-0.92
CB8-2-19	126	0.044641	0.001503	0.282279	0.000011	-13.65	0.39	1349	2049	-0.95
CB8-2-20	135	0.050936	0.001748	0.282297	0.000014	-13.04	0.50	1332	2010	-0.95
CB8-2-21	121	0.060654	0.001998	0.282280	0.000012	-13.65	0.43	1365	2048	-0.94
CB8-2-22	122	0.056549	0.001876	0.282274	0.000012	-13.85	0.41	1369	2061	-0.94
CB8-2-23	124	0.052526	0.001759	0.282266	0.000014	-14.13	0.49	1376	2078	-0.95

CB8-2-24	127	0.120213	0.003881	0.282340	0.000015	-11.71	0.53	1349	1925	-0.88
CB8-2-25	125	0.078298	0.002538	0.282326	0.000012	-12.07	0.43	1319	1948	-0.92