

doi:10.3799/dqkx.2016.067

内蒙乌拉特中旗图古日格二叠纪角闪石岩年龄、 岩石成因及构造背景

王 键, 孙丰月*, 李碧乐, 王英德, 李睿华

吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

摘要: 为了对古亚洲洋的演化提供新的资料, 对内蒙中部乌拉特中旗图古日格角闪石岩进行了角闪石电子探针分析、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学, 锆石 Hf 同位素和岩石地球化学分析, 以确定其岩石成因及其地球动力学背景。两件测年样品加权平均年龄分别为 273.5 ± 1.3 Ma (MSWD=0.48) 和 274.4 ± 4.3 Ma (MSWD=0.041), 属于早二叠世晚期。角闪石岩贫 SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O , 富 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 和 CaO , $\text{Mg}^\#$ 值为 $46.95 \sim 63.53$, M/F 比值为 $0.87 \sim 1.72$; 稀土元素配分曲线为右倾型, 和原始地幔相比明显富集大离子亲石元素 (Rb、Ba、K), 而高场强元素 Nb、Ta 和 Ti 相对亏损, Th、U 同样显示出相对亏损。电子探针分析结果表明角闪石岩中角闪石属于钙质角闪石, 具有幔源角闪石的特点。角闪石岩中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-0.3 \sim 8.5$, 锆石 Hf 单阶段模式年龄 (t_{DM1}) 为 $580 \sim 920$ Ma。研究表明其源区主要为亏损地幔, 上涌过程中与富集岩石圈地幔发生相互作用, 形成具有富集地幔特征岩浆。结合区域地质演化, 认为角闪石岩形成于古亚洲洋闭合后的伸展环境, 可能与俯冲板片的断离有关。

关键词: 内蒙; 乌拉特中旗; 晶体化学; 年代学; 地球化学; Hf 同位素。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2016)05-0792-17

收稿日期: 2016-02-26

Age, Petrogenesis and Tectonic Implications of Permian Hornblendite in Tugurige, Urad Zhongqi, Inner Mongolia

Wang Jian, Sun Fengyue*, Li Bile, Wang Yingde, Li Ruihua

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

Abstract: Electron microprobe results, zircon U-Pb dating, Hf isotope data and geochemistry of hornblendite at Tugurige, Urad Zhongqi, Inner Mongolia are reported in the paper, which provide constraints on formation time, magma source, and tectonic setting of the intrusions. The dating results indicate that the hornblendite formed in the late Early Permian (273.5 ± 1.3 Ma, MSWD=0.48; 274.4 ± 4.3 Ma, MSWD=0.041), and it contains low Na_2O and K_2O , high Al_2O_3 , TFe_2O_3 , MgO , CaO , $\text{Mg}^\# = 46.95 - 63.53$, $\text{M}/\text{F} = 0.87 - 1.72$. Chondrite-normalized REE patterns show LREE enrichment. On a trace element spider diagram, large ion lithophile elements (LILEs) such as Rb, Ba and K are enriched, whereas the high field strength elements Ti, P, Th and U are relatively depleted. Electronic Probe analysis results show that hornblende belongs to calcic amphibole and has the characteristics of mantle hornblende. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of zircons from the hornblendite vary between -0.3 and 8.5 , and their Hf one-stage model ages vary from 580 to 920 Ma, implying that their magma source was derived from a depleted mantle and may have been added metasomatic enriched lithospheric mantle components. Combined with regional tectonic evolution, the hornblendite formed in the post-collisional extension setting, perhaps triggered by slab break-off.

Key words: Inner Mongolia; Urad Zhongqi; crystal chemistry; geochronology; geochemistry; Hf isotope.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41272093); 中国地质调查局项目 (No.12120113098300).

作者简介: 王键 (1987-), 男, 博士研究生, 主要从事岩石学、矿物学、矿床学方面的研究. E-mail: wjian118@hotmail.com

* 通信作者: 孙丰月, E-mail: sunfy_66@126.com

引用格式: 王键, 孙丰月, 李碧乐, 等, 2016. 内蒙乌拉特中旗图古日格二叠纪角闪石岩年龄、岩石成因及构造背景. 地球科学, 41(5): 792-808.

0 引言

内蒙古乌拉特中旗位于中亚造山带东段(图 1),北临索伦克蛇绿岩带,南部为华北板块,大地构造分区属于白乃庙—温都尔庙早古生代陆缘增生带(Xiao *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2013),由于其处于华北板块和西伯利亚板块之间,是研究两大板块拼合及古亚洲洋闭合的重要地区.内蒙中部缝合带位置不存在异议,位于索伦山一线(Xiao *et al.*, 2009),但对于古亚洲洋最终闭合的时限问题有着不同的认识,主要有两种观点:一部分学者认为闭合时间为晚泥盆世—早石炭世(Tang, 1990; 邵济安, 1991; 洪大卫等, 1994; 徐备和陈斌, 1997),另一些学者认为闭合时间为二叠纪末(Shen *et al.*, 2006; 李锦轶等, 2007; Miao *et al.*, 2008; Xiao *et al.*, 2009),由于古亚洲洋的消亡及两大板块的碰撞作用在该区发育大规模不同时代、不同类型的花岗岩(童英等, 2010),因此目前对于花岗岩的研究较多(罗红玲等, 2007; 2009; 童英等, 2010),但对于基性—超基性岩的研究

相对较少(赵磊等, 2008, 2011),笔者在对乌拉特中旗图古日格进行矿调时发现,角闪岩呈岩株状产出,岩性较为单一,矿物组成简单,可能具有特殊的意义.本文在野外观察,室内岩相学的基础上,对角闪岩进行电子探针、锆石 LA-ICP-MS 年代学、锆石 Hf 同位素和岩石地球化学研究,并结合前人研究成果探讨了该岩体的源区性质及其形成地球动力学背景,为该区地球动力学演化研究提供了参考依据.

1 研究区地质特征及样品描述

区内出露地层为宝音图群上段,沉积年龄下限年龄约为 1 426 Ma,其形成时代为中元古代中期(孙立新等, 2013),其岩性为一套浅灰、灰白、褐灰色石英岩、大理岩夹云母石英片岩及石榴蓝晶二云片岩.区内断裂发育,呈 NW 向产出,断裂长几百米至几公里,断裂中石英脉较为发育,部分石英脉中 Au 含量较高,形成含 Au 石英脉.区内岩浆岩分布广泛,

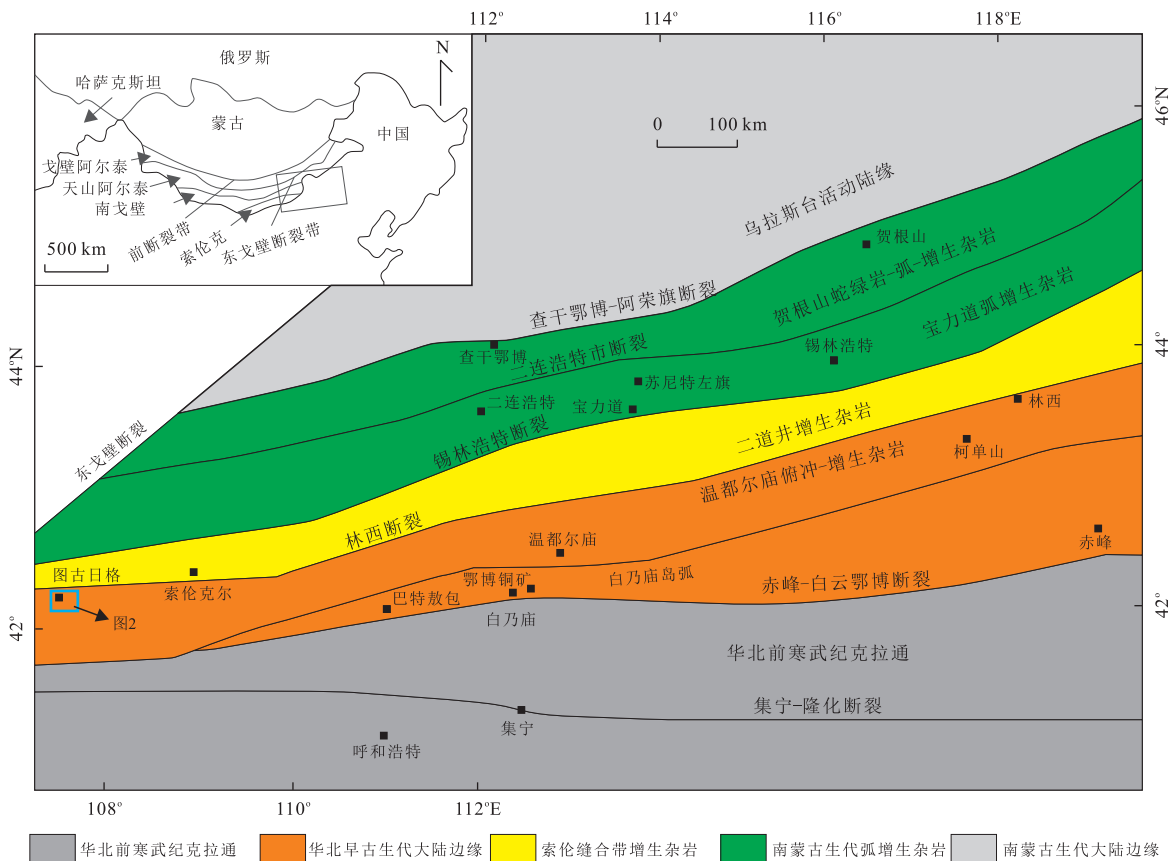


图 1 中亚造山带东部构造地质简图

Fig.1 Tectonic sketch of eastern Central Asian orogenic belt

据 Xiao *et al.*(2009)

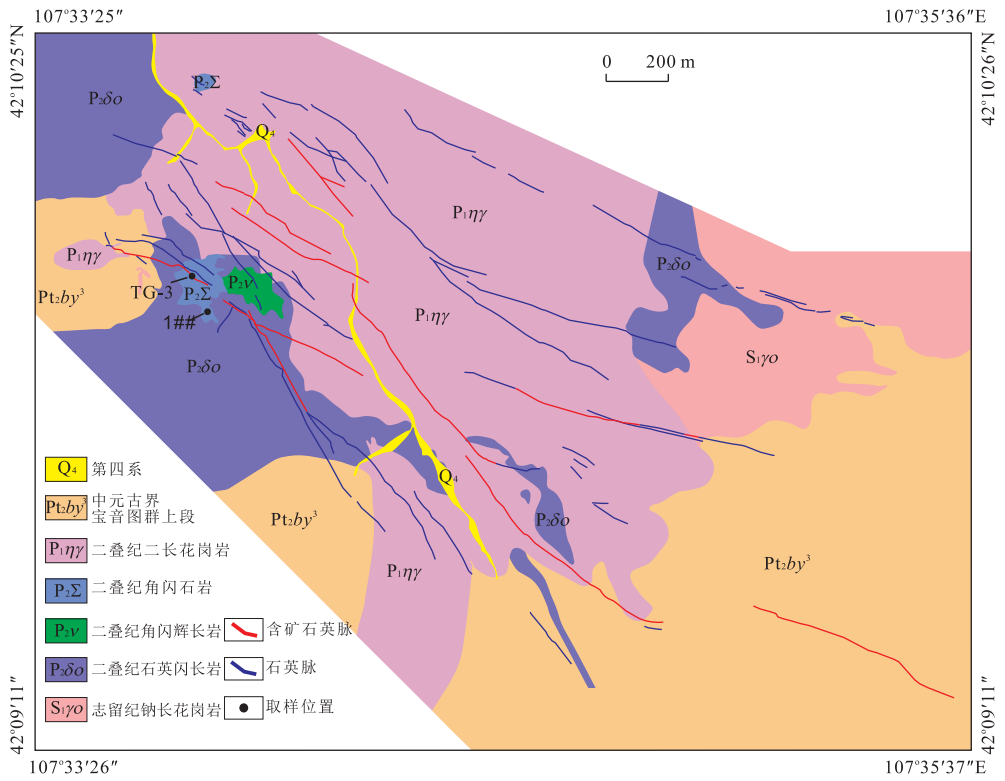


图 2 乌拉特中旗图古日格地区地质

Fig.2 Detailed geological sketch of Tugurige, Urad Zhongqi
据核工业二〇八大队内部资料(2013)改

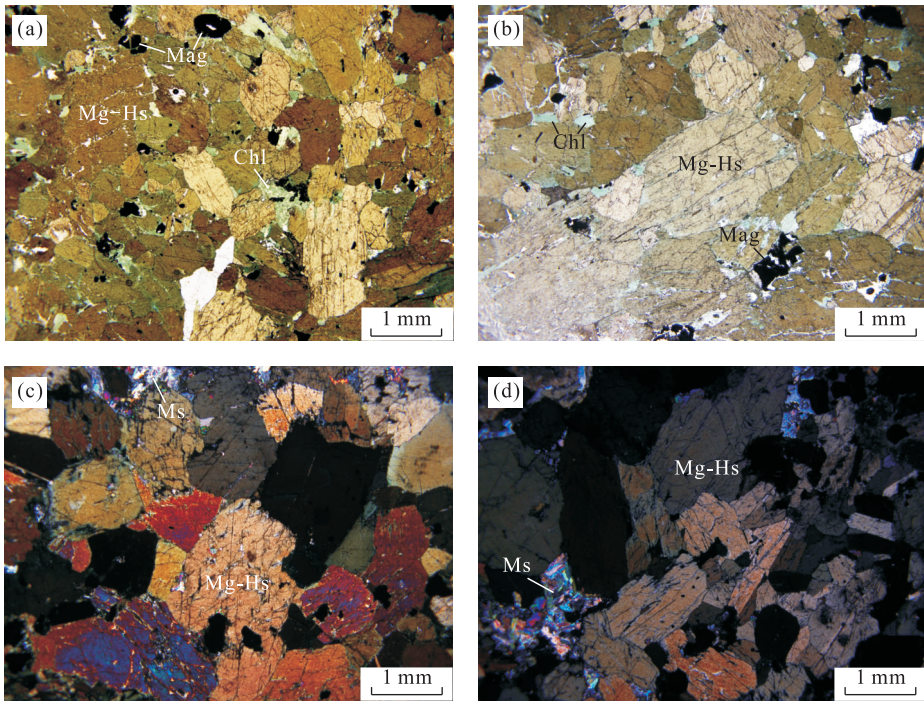


图 3 图古日格早二叠世角闪岩显微照片

Fig.3 Microphotographs of Early Permian hornblendite

a, b.角闪石呈长柱状,粒状,边部可见少量绿帘石化(单偏光); c.角闪石两组斜交节理, II 级蓝干涉色(正交偏光); d.角闪岩中的白云母化(正交偏光); Mg-Hs. 镁铝钙闪石; Mag. 磁铁矿; Chl. 绿泥石; Ms. 白云母

早古生代岩浆岩有志留纪钠长花岗岩;晚古生代岩体较为发育,岩性由酸性至基性,主要有二叠纪二长花岗岩,呈岩基状侵入下元古界宝音图群中,岩体具有似斑状结构,属于准铝质高钾钙碱性系列,并具有埃达克岩的特征,锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 300.1 ± 5.6 Ma 和 297.4 ± 2.4 Ma (Wang *et al.*, 2015); 另外有二叠纪石英闪长岩,角闪辉石岩及角闪石岩均呈岩珠状产出,侵入二叠纪二长花岗岩中。本次所研究角闪石岩体呈岩株状侵入石英闪长岩体中,出露面积较小(图 2)。

两件测年样品(TG-3; 1# #)分别来自地表($42^{\circ}9'57''\text{N}$, $107^{\circ}33'50''\text{E}$)及图古日格金矿 1 号井(1# #)坑道中,岩石呈黑色或黑绿色,细粒结构,块状构造,组成岩石的矿物成主要分为角闪石(90%~95%)和少量斜长石(5%)。角闪石为自形半自形结构,呈长柱状,粒状,粒度为 0.5~2.0 mm,单偏光下颜色为黄绿色。副矿物主要为磁铁矿,粒度为 0.1~0.5 mm,充填于角闪石矿物颗粒之间,另外有少量锆石。角闪石边部发育少量绿泥石化及白云母化(图 3),蚀变作用可能是导致岩石整体 K 含量高于角闪石中 K 含量的重要原因。

2 测试方法

2.1 角闪石电子探针测试

电子探针测试研究在中国冶金地质总局山东局测试中心完成,使用仪器为日本电子(JEOL)JXA-8230 型电子探针显微分析仪。工作电压为 20 kV,工作电流为 20 nA,分析束斑为 5 μm (较小矿物为 1 μm 左右),峰值积分时间为 10 s,背景积分时间为 5 s,标准样品均选用美国 SPI 矿物,标样测试条件与未知样品一致,计数率稳定可靠。

2.2 锆石 LA-ICP-MS 分析方法

锆石的挑选在河北省廊坊区域地质调查研究所实验室利用标准重矿物分离技术分选完成。经过双目镜下的仔细挑选,将不同特征的锆石粘在双面胶上,并用无色透明的环氧树脂固定,待其固化之后,将其表面抛光至锆石中心(李碧乐等,2016)。在原位分析前,通过反射光和 CL 图像仔细研究锆石晶体的形态与内部结构特征来选择最佳分析点。锆石制靶、反射光、阴极发光以及锆石 U-Pb 年龄测定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进行。本次测试采用的激光剥蚀束斑直径为 32 μm ,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm 。实验中

采用 He 作为剥蚀物质的载气。锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标,元素含量采用 NIST SRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标元素,锆石中 SiO_2 含量为 32.8% (袁洪林等,2003),分析方法见文献 Yuan *et al.* (2004)。样品的同位素比值及元素含量计算采用 ICP-MS-DTECAL 程序 (Liu *et al.*, 2009),年龄计算及谐和图的绘制采用 Ludwig 编写的 Isoplot 程序 (Ludwig, 2003)。

2.3 锆石 Lu-Hf 同位素测试

原位微区锆石 Hf 同位素比值测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用激光剥蚀多接收杯等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005 (Lambda Physik, 德国),MC-ICP-MS 为 Neptune Plus (Thermo Fisher Scientific, 德国)。该系统配备了本实验室自主研发的信号平滑装置。采用该装置的优势在于,即使激光脉冲频率降到 1 Hz,还可以获得平稳的信号 (Hu *et al.*, 2012a)。对于 193 nm 的激光,在给定的仪器条件下,使用氦气作为载气比使用氩气的信号灵敏度提高了 2 倍 (Hu *et al.*, 2008a)。笔者研究还表明,少量氮气的引入还可进一步提升大部分元素的灵敏度 (Hu *et al.*, 2008b)。相对于 Neptune Plus 的标准锥组合,新设计的 X 截取锥和 Jet 采样锥组合在少量氮气加入的条件下能分别提高 Hf、Yb 和 Lu 的灵敏度 5.3 倍、4.0 倍和 2.4 倍。激光输出能量可以调节,实际输出能量密度为 5.3 J/cm^2 。采用单点剥蚀模式,斑束固定为 44 μm 。详细仪器操作条件和分析方法可参照 Hu *et al.* (2012b)。

采用 LA-MC-ICP-MS 准确测试锆石 Hf 同位素的难点在于 ^{176}Yb 和 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的同量异位素的干扰扣除。研究表明, Yb 的质量分馏系数 (β_{Yb}) 在长期测试过程中并不是一个固定值,而且通过溶液进样方式测试得到的 β_{Yb} 并不适用于激光进样模式中的锆石 Hf 同位素干扰校正 (Woodhead *et al.*, 2004)。 β_{Yb} 的错误估算会明显地影响 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的干扰校正,进而影响 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值的准确性。在本次试验中,笔者实时获取了锆石样品自身的 β_{Yb} 用于干扰校正。 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$ 和 $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb} = 1.132685$ (Fisher *et al.*, 2014) 被用于计算 Hf 和 Yb 的质量分馏系数 β_{Hf} 和 β_{Yb} 。 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb}$ 的比值被用于计算 Hf (β_{Hf}) and Yb (β_{Yb}) 的质量偏差。使用 $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb} = 0.79639$ (Fisher *et al.*, 2014) 来扣除 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的同量异位干

扰.使用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.026\ 56$ (Blichert-Toft *et al.*, 1997)来扣除干扰程度相对较小的 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的同量异位干扰.由于 Yb 和 Lu 具有相似的物理化学属性,因此在本实验中采用 Yb 的质量分馏系数 β_{Yb} 来校正 Lu 的质量分馏行为.分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、同位素质量分馏校正)采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2009)完成.

2.4 岩石地球化学测试

全岩主量元素和微量元素分析在核工业北京地质研究院分析测试中心完成.其中主量元素分析采用 X-荧光光谱法(XRF),微量元素分析采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS).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一般优于 10%(Rudnick *et al.*, 2004).

3 测试结果

3.1 角闪石电子探针测试结果

角闪岩电子探针分析结果见表 1.由表 1 可知,角闪石岩中角闪石的成分变化不大,显示出同一岩浆演化结晶作用的结果.角闪石具有较高的 TFeO(12.52%~16.14%)、MgO(10.49%~12.65%)、CaO(10.87%~11.40%)和 Al(10.87%~13.58%)含量,较低的 SiO₂(40.57%~43.37%)、Na₂O(2.06%~2.36%)和 K₂O(0.74%~1.08%)含量,另外角闪石中 TiO₂含量为 1.06%~3.19%,并含有少量的 Cr₂O₃(0~0.14%)、CoO(0~0.07%)和 NiO(0~0.04%).

角闪石的一般晶体化学式为 A₀₋₁B₂C₅T₈O₂₂(OH)₂.由于 H₂O 和卤素的含量不确定,故对于角闪石电子探针数据,笔者采用分子式 23(O)及假设 2(OH, F, Cl)为基础计算角闪石的阳

表 1 图古日格角闪石岩中角闪石电子探针分析结果

Table 1 Results of electron microprobe analysis of Tugurige hornblendite

| | 样品 | TG3-1 | TG3-2 | TG3-3 | TG3-4 | TG3-5 | TG3-6 | TG4-1 | TG4-2 | TG4-3 | TG4-4 | TG4-5 | TG4-6 |
|------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | SiO ₂ | 40.96 | 41.75 | 40.91 | 43.37 | 41.27 | 40.57 | 41.84 | 41.19 | 41.29 | 42.06 | 42.09 | 41.58 |
| | TiO ₂ | 2.47 | 2.34 | 2.41 | 1.91 | 2.64 | 2.39 | 1.06 | 2.10 | 3.19 | 2.56 | 2.41 | 2.28 |
| | Al ₂ O ₃ | 13.28 | 12.69 | 13.21 | 10.87 | 13.58 | 12.99 | 13.17 | 12.72 | 12.63 | 12.33 | 12.19 | 12.86 |
| | TFeO | 13.40 | 14.54 | 14.07 | 15.49 | 12.90 | 16.14 | 15.53 | 12.81 | 13.28 | 13.07 | 13.97 | 12.52 |
| 百分含量 | Cr ₂ O ₃ | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.02 |
| | MnO | 0.18 | 0.20 | 0.17 | 0.24 | 0.17 | 0.22 | 0.21 | 0.14 | 0.14 | 0.15 | 0.20 | 0.18 |
| | MgO | 11.84 | 11.60 | 11.59 | 11.82 | 12.24 | 10.49 | 11.23 | 11.91 | 12.35 | 12.65 | 12.00 | 12.34 |
| | CaO | 11.13 | 11.05 | 11.25 | 10.87 | 11.19 | 11.01 | 11.10 | 11.30 | 11.08 | 11.40 | 11.05 | 11.33 |
| | CoO | 0.01 | 0.06 | 0.07 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.07 | 0.04 | 0.07 | 0.03 | 0.02 | 0.04 |
| | NiO | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.04 |
| | K ₂ O | 0.96 | 1.08 | 0.90 | 0.88 | 0.80 | 0.97 | 0.74 | 0.92 | 0.85 | 0.91 | 1.00 | 0.79 |
| | Na ₂ O | 2.36 | 2.23 | 2.33 | 2.06 | 2.28 | 2.18 | 2.22 | 2.21 | 2.13 | 2.17 | 2.18 | 2.27 |
| | Total | 96.61 | 97.56 | 96.94 | 97.55 | 97.11 | 96.99 | 97.31 | 95.34 | 96.99 | 97.34 | 97.12 | 96.25 |
| | T | Si | 6.17 | 6.29 | 6.16 | 6.53 | 6.22 | 6.11 | 6.30 | 6.20 | 6.22 | 6.34 | 6.34 |
| Al ^{IV} | | 1.83 | 1.71 | 1.84 | 1.47 | 1.78 | 1.89 | 1.70 | 1.80 | 1.78 | 1.66 | 1.66 | 1.74 |
| C | Al ^{VI} | 0.52 | 0.54 | 0.50 | 0.46 | 0.62 | 0.41 | 0.64 | 0.46 | 0.46 | 0.52 | 0.50 | 0.54 |
| | Ti | 0.25 | 0.23 | 0.24 | 0.19 | 0.26 | 0.24 | 0.11 | 0.21 | 0.32 | 0.26 | 0.24 | 0.23 |
| | Cr | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Fe ³⁺ | 1.47 | 1.58 | 1.53 | 1.65 | 1.33 | 1.53 | 1.69 | 1.04 | 1.42 | 1.35 | 1.52 | 1.40 |
| | Mn | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 |
| | Mg | 2.67 | 2.62 | 2.62 | 2.67 | 2.77 | 2.37 | 2.54 | 2.69 | 2.79 | 2.86 | 2.71 | 2.79 |
| | Fe ²⁺ | 0.06 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.42 | 0.00 | 0.58 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| | B | Ca | 1.80 | 1.78 | 1.82 | 1.75 | 1.81 | 1.78 | 1.79 | 1.82 | 1.79 | 1.84 | 1.78 |
| Na | 0.20 | 0.22 | 0.18 | 0.25 | 0.19 | 0.22 | 0.21 | 0.18 | 0.21 | 0.16 | 0.22 | 0.17 | |
| A | Na | 0.48 | 0.43 | 0.50 | 0.36 | 0.47 | 0.41 | 0.44 | 0.47 | 0.41 | 0.47 | 0.42 | 0.49 |
| | K | 0.18 | 0.21 | 0.17 | 0.17 | 0.15 | 0.19 | 0.14 | 0.18 | 0.16 | 0.18 | 0.19 | 0.15 |
| | Fe ³⁺ +Fe ²⁺ | 1.53 | 1.58 | 1.61 | 1.65 | 1.33 | 1.95 | 1.69 | 1.62 | 1.42 | 1.35 | 1.52 | 1.42 |
| | Mg/(Mg+Fe ²⁺) | 0.98 | 1.00 | 0.97 | 1.00 | 1.00 | 0.85 | 1.00 | 0.82 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| | Si/(Si+Ti+Al) | 0.703 | 0.717 | 0.705 | 0.755 | 0.700 | 0.706 | 0.721 | 0.716 | 0.709 | 0.722 | 0.725 | 0.714 |
| | Ca/(Ca+Mg+Fe) | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.29 | 0.31 | 0.29 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 |

离子系数、晶体化学式及有关特征参数,由于电子探针测试数据无法获得 Fe³⁺ 和 Fe²⁺ 值,笔者采用以

13 个阳离子为基准的计算方法统一计算(IMA-CNMMN 角闪石专业委员会全体成员, 2001). 计算

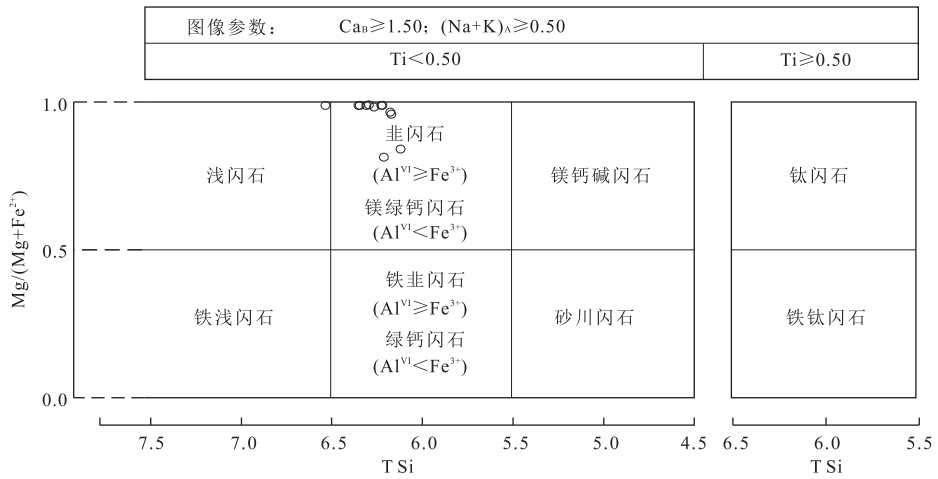


图 4 角闪石的成分变化与定名

Fig.4 Classification of hornblendes

Ca_B , B 位置 Ca 原子数; $(Na+K)_A$, A 位置 Na 与 K 原子数之和; TSi, T 位置 Si 原子数; Al^{VI} , C 位置 Al^{VI} 的原子数; Fe^{3+} , C 位置 Fe^{3+} 的原子数; 据 Leake(1997)

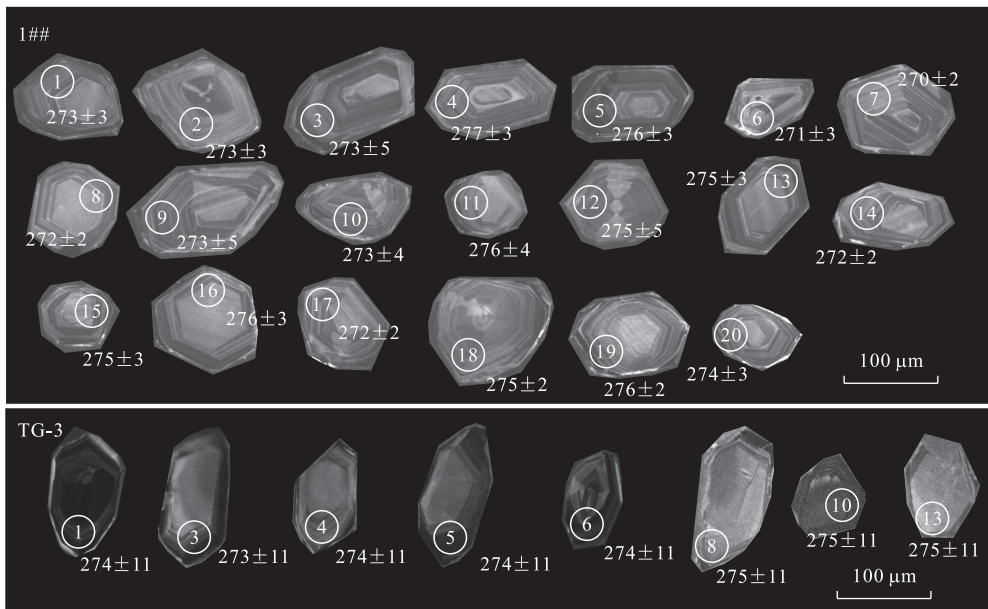


图 5 图古日格角闪岩部分锆石阴极发光图像

Fig.5 Cathodoluminescence images of analyzed zircons from Tugurige hornblende

结果显示(表 1),角闪石的化学成分变化不大,在晶体化学式中 $(Na+Ca)_B > 1.5$,且 $Na_B < 0.5$,属于钙角闪石组, $(Na+K)_A > 0.5$, $Ti < 0.5$, Si 介于 6.1 和 6.5 之间, $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 介于 0.5 和 1 之间, $Al^{VI} < Fe^{3+}$, 按照 Leake(1997) 的分类, 其应属于镁绿钙闪石(图 4).

3.2 锆石 LA-ICP-MS 年代学

样品 1## 和样品 TG-3 锆石阴极发光图像显示如图 5, 样品 1## 锆石自形程度较好, 主要为长柱状和粒状, 锆石长径为 100~120 μm , 具有明显的

韵律环带结构, 显示其为岩浆成因, 20 个测试点结果表明(表 2): U ($170.5 \times 10^{-6} \sim 746.0 \times 10^{-6}$) 和 Th ($100.5 \times 10^{-6} \sim 854.3 \times 10^{-6}$) 含量较高, Th/U 比值为 0.51~1.15, 均值为 0.60. 在锆石 U-Pb 谐和图(图 6a)中, 所有数据点均落在谐和线及其附近, 20 个 $^{206}Pb/^{238}U$ 数据的加权平均年龄为 273.5 ± 1.3 Ma, MSWD=0.48(图 6b).

样品 TG-3 锆石自形程度较差, 其阴极发光图像总体偏暗, 少数可见韵律环带结构, 主要呈长柱状、粒状和不规则状, 锆石长径为 100~140 μm . 与

表 2 图古日格角闪石岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年结果

Table 2 Results of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Tugurige hornblende

| 测点号 | Pb(10^{-6}) | Th(10^{-6}) | U(10^{-6}) | Th/U | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | |
|---------|-----------------|-----------------|----------------|------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|
| | | | | | 比值 | 1 σ | 比值 | 1 σ | 比值 | 1 σ | 年龄(Ma) | 1 σ |
| 1#-1 | 43.7 | 177.2 | 311.1 | 0.57 | 0.052 1 | 0.002 3 | 0.309 2 | 0.013 4 | 0.043 2 | 0.000 5 | 273 | 3 |
| 1#-2 | 34.6 | 130.8 | 258.1 | 0.51 | 0.051 8 | 0.002 1 | 0.310 5 | 0.012 7 | 0.043 3 | 0.000 4 | 273 | 3 |
| 1#-3 | 58.3 | 246.1 | 348.6 | 0.71 | 0.052 8 | 0.005 7 | 0.313 3 | 0.033 3 | 0.043 2 | 0.000 8 | 273 | 5 |
| 1#-4 | 47.4 | 200.3 | 302.0 | 0.66 | 0.049 6 | 0.001 9 | 0.297 3 | 0.011 1 | 0.043 8 | 0.000 5 | 277 | 3 |
| 1#-5 | 89.0 | 345.4 | 632.2 | 0.55 | 0.051 5 | 0.001 9 | 0.312 5 | 0.012 2 | 0.043 8 | 0.000 5 | 276 | 3 |
| 1#-6 | 50.1 | 208.5 | 363.4 | 0.57 | 0.047 4 | 0.001 9 | 0.281 7 | 0.011 5 | 0.043 0 | 0.000 4 | 271 | 3 |
| 1#-7 | 76.1 | 330.6 | 440.5 | 0.75 | 0.049 5 | 0.001 9 | 0.292 6 | 0.011 0 | 0.042 8 | 0.000 4 | 270 | 2 |
| 1#-8 | 118.8 | 510.9 | 742.6 | 0.69 | 0.050 5 | 0.001 3 | 0.302 2 | 0.008 2 | 0.043 0 | 0.000 3 | 272 | 2 |
| 1#-9 | 26.4 | 101.1 | 179.6 | 0.56 | 0.051 7 | 0.003 5 | 0.310 1 | 0.021 6 | 0.043 3 | 0.000 7 | 273 | 5 |
| 1#-10 | 72.0 | 318.5 | 488.0 | 0.65 | 0.050 0 | 0.002 7 | 0.299 2 | 0.015 5 | 0.043 3 | 0.000 6 | 273 | 4 |
| 1#-11 | 55.3 | 233.1 | 358.6 | 0.65 | 0.053 1 | 0.004 1 | 0.318 1 | 0.024 1 | 0.043 8 | 0.000 7 | 276 | 4 |
| 1#-12 | 29.9 | 135.2 | 249.8 | 0.54 | 0.049 2 | 0.004 9 | 0.299 5 | 0.031 0 | 0.043 5 | 0.000 8 | 275 | 5 |
| 1#-13 | 38.7 | 154.9 | 285.9 | 0.54 | 0.050 9 | 0.002 2 | 0.304 9 | 0.013 0 | 0.043 6 | 0.000 5 | 275 | 3 |
| 1#-14 | 66.0 | 289.4 | 398.8 | 0.73 | 0.050 2 | 0.001 8 | 0.299 4 | 0.010 6 | 0.043 1 | 0.000 4 | 272 | 2 |
| 1#-15 | 39.3 | 161.9 | 265.1 | 0.61 | 0.050 4 | 0.002 3 | 0.303 7 | 0.013 8 | 0.043 5 | 0.000 5 | 275 | 3 |
| 1#-16 | 52.8 | 227.3 | 357.5 | 0.64 | 0.050 5 | 0.002 8 | 0.303 6 | 0.015 6 | 0.043 7 | 0.000 6 | 276 | 3 |
| 1#-17 | 49.0 | 200.4 | 353.8 | 0.57 | 0.053 0 | 0.001 7 | 0.316 7 | 0.010 4 | 0.043 1 | 0.000 4 | 272 | 2 |
| 1#-18 | 55.5 | 218.9 | 365.3 | 0.60 | 0.051 1 | 0.001 9 | 0.307 2 | 0.011 0 | 0.043 5 | 0.000 4 | 275 | 2 |
| 1#-19 | 190.4 | 854.3 | 746.0 | 1.15 | 0.050 7 | 0.001 4 | 0.306 8 | 0.008 2 | 0.043 7 | 0.000 3 | 276 | 2 |
| 1#-20 | 25.3 | 100.5 | 170.5 | 0.59 | 0.052 7 | 0.003 2 | 0.307 8 | 0.017 3 | 0.043 5 | 0.000 6 | 274 | 3 |
| TG-3-1 | 14.0 | 200.3 | 247.8 | 0.81 | 0.051 8 | 0.002 9 | 0.310 5 | 0.019 0 | 0.043 5 | 0.001 8 | 274 | 11 |
| TG-3-2 | 31.1 | 440.1 | 569.0 | 0.77 | 0.052 0 | 0.001 9 | 0.311 4 | 0.013 9 | 0.043 5 | 0.001 7 | 274 | 11 |
| TG-3-3 | 11.1 | 121.8 | 194.8 | 0.63 | 0.052 0 | 0.002 5 | 0.310 6 | 0.016 8 | 0.043 3 | 0.001 8 | 273 | 11 |
| TG-3-4 | 55.7 | 556.4 | 1 068.0 | 0.52 | 0.054 3 | 0.001 8 | 0.324 9 | 0.013 6 | 0.043 4 | 0.001 7 | 274 | 11 |
| TG-3-5 | 95.6 | 1 012.1 | 2 146.9 | 0.47 | 0.051 2 | 0.001 6 | 0.306 4 | 0.012 5 | 0.043 4 | 0.001 7 | 274 | 11 |
| TG-3-6 | 40.3 | 761.4 | 630.6 | 1.21 | 0.051 9 | 0.002 1 | 0.311 0 | 0.014 9 | 0.043 5 | 0.001 8 | 274 | 11 |
| TG-3-7 | 29.9 | 449.6 | 536.7 | 0.84 | 0.054 2 | 0.002 6 | 0.319 8 | 0.017 1 | 0.042 8 | 0.001 8 | 270 | 11 |
| TG-3-8 | 25.1 | 398.3 | 472.4 | 0.84 | 0.051 5 | 0.002 0 | 0.309 2 | 0.014 1 | 0.043 6 | 0.001 8 | 275 | 11 |
| TG-3-9 | 73.8 | 1 344.4 | 1 332.0 | 1.01 | 0.051 7 | 0.001 7 | 0.308 5 | 0.013 0 | 0.043 3 | 0.001 7 | 273 | 11 |
| TG-3-10 | 88.3 | 1 763.9 | 1 250.1 | 1.41 | 0.051 5 | 0.002 9 | 0.309 3 | 0.018 6 | 0.043 6 | 0.001 8 | 275 | 11 |
| TG-3-11 | 165.9 | 3 119.5 | 2 847.9 | 1.10 | 0.052 0 | 0.001 7 | 0.310 0 | 0.013 0 | 0.043 3 | 0.001 7 | 273 | 11 |
| TG-3-12 | 120.6 | 1 872.8 | 2 096.7 | 0.89 | 0.051 1 | 0.001 6 | 0.307 1 | 0.012 5 | 0.043 6 | 0.001 8 | 275 | 11 |
| TG-3-13 | 75.8 | 1 936.6 | 1 132.4 | 1.71 | 0.051 8 | 0.001 8 | 0.310 9 | 0.013 3 | 0.043 5 | 0.001 8 | 275 | 11 |
| TG-3-14 | 29.0 | 299.4 | 504.7 | 0.59 | 0.051 6 | 0.002 5 | 0.308 6 | 0.016 8 | 0.043 4 | 0.001 8 | 274 | 11 |
| TG-3-15 | 94.2 | 957.8 | 2 041.9 | 0.47 | 0.051 7 | 0.001 8 | 0.309 2 | 0.013 2 | 0.043 4 | 0.001 8 | 274 | 11 |
| TG-3-16 | 21.8 | 133.7 | 448.8 | 0.30 | 0.050 0 | 0.001 9 | 0.298 9 | 0.013 5 | 0.043 3 | 0.001 8 | 274 | 11 |
| TG-3-17 | 74.7 | 1 094.6 | 1 281.5 | 0.85 | 0.051 5 | 0.002 1 | 0.310 1 | 0.014 6 | 0.043 7 | 0.001 8 | 276 | 11 |
| TG-3-18 | 42.2 | 397.3 | 860.0 | 0.46 | 0.051 5 | 0.001 9 | 0.308 1 | 0.014 0 | 0.043 4 | 0.001 8 | 274 | 11 |
| TG-3-19 | 37.9 | 744.2 | 537.2 | 1.39 | 0.052 3 | 0.003 1 | 0.312 6 | 0.020 1 | 0.043 3 | 0.001 8 | 273 | 11 |
| TG-3-20 | 22.9 | 184.4 | 435.1 | 0.42 | 0.050 0 | 0.001 8 | 0.309 2 | 0.013 4 | 0.044 8 | 0.001 8 | 283 | 11 |
| TG-3-21 | 28.7 | 225.1 | 581.0 | 0.39 | 0.051 6 | 0.001 9 | 0.308 4 | 0.013 8 | 0.043 3 | 0.001 8 | 274 | 11 |
| TG-3-22 | 124.2 | 4 611.9 | 1 706.3 | 2.70 | 0.051 3 | 0.002 0 | 0.308 4 | 0.014 4 | 0.043 6 | 0.001 8 | 275 | 11 |
| TG-3-23 | 47.6 | 555.1 | 910.0 | 0.61 | 0.051 3 | 0.003 2 | 0.313 8 | 0.020 8 | 0.044 3 | 0.001 9 | 280 | 12 |
| TG-3-24 | 178.6 | 2 543.6 | 3 706.5 | 0.69 | 0.051 1 | 0.001 8 | 0.306 6 | 0.013 2 | 0.043 5 | 0.001 8 | 275 | 11 |
| TG-3-25 | 29.4 | 257.3 | 556.8 | 0.46 | 0.051 9 | 0.003 6 | 0.309 6 | 0.022 5 | 0.043 3 | 0.001 9 | 273 | 11 |

样品 1#-# 相比, $U(194.8 \times 10^{-6} \sim 3 706.5 \times 10^{-6})$ 和 $Th(194.8 \times 10^{-6} \sim 4 661.9 \times 10^{-6})$ 含量较高且变化范围较大, Th/U 比值为 0.30~2.70, 均值为 0.86. 在锆石 U-Pb 谐和图(图 6c)中, 所有数据点均落在谐和线上及其附近, 25 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据的加权平均年龄为 274.4 ± 4.3 Ma, MSWD=0.041(图 6d).

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素

对样品 1#-#-N1 中锆石进行 Lu-Hf 同位素测试, 测试点尽量选取与 U-Pb 年龄测定位置相同或相

近, 分析结果见表 3. 图古日格角闪石岩中锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.000 613~0.001 881, $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值为 $-0.98 \sim -0.94$, 低于上地壳 ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.009 3$, $f_{\text{Lu/Hf}} = -0.72$) 的值 (Vervoort and Patchett, 1996). 锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 597~0.282 552, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-0.3 \sim 8.5$, 锆石 Hf 单阶段模式年龄 (t_{DMI}) 为 580~920 Ma, 主要集中于 760~850 Ma.

3.4 岩石地球化学结果

图古日格角闪石岩样品的主量元素、稀土元素

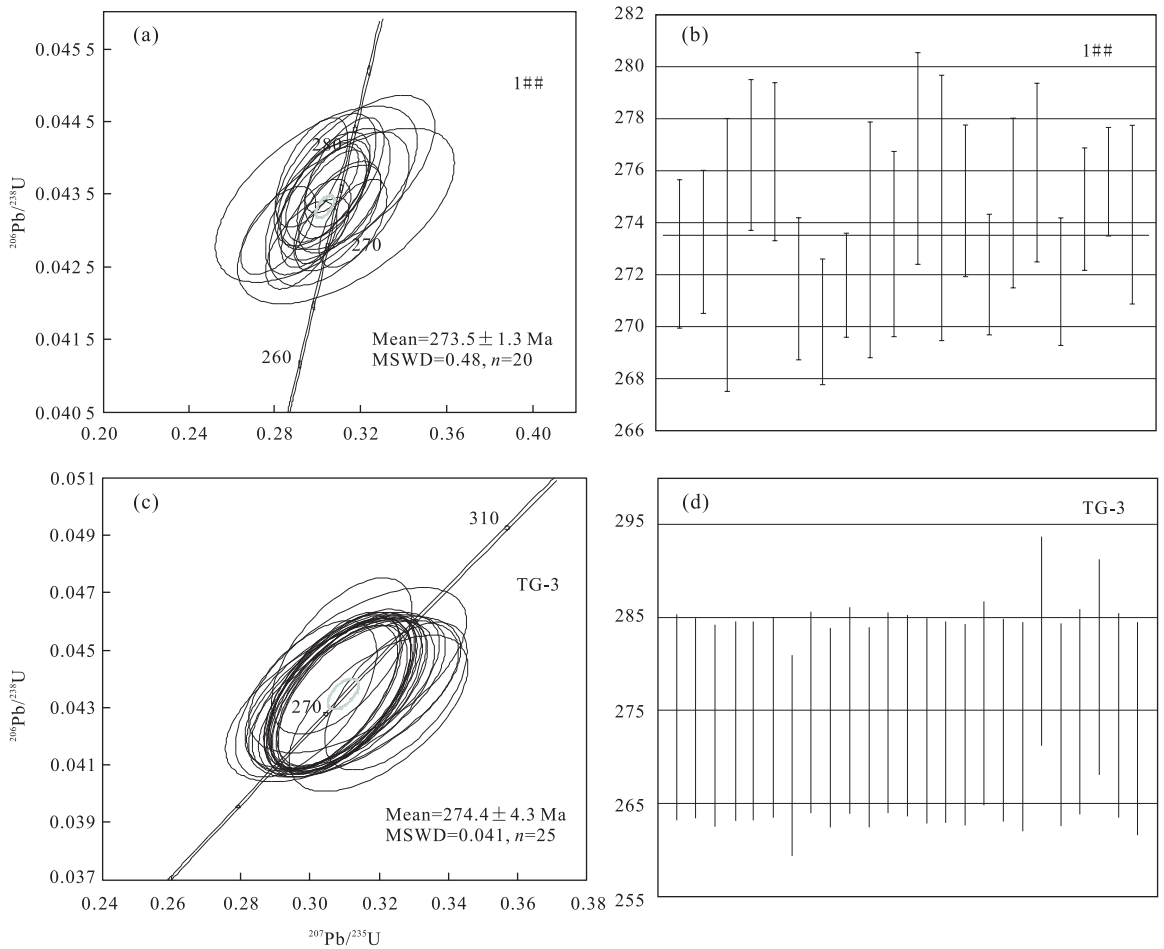


图 6 角闪岩样品中锆石的 U-Pb 年龄谐和图和加权平均年龄

Fig.6 Zircon U-Pb concordia diagram and weighted average ages diagram for hornblende

a.样品 1## 中锆石 U-Pb 年龄谐和图;b.样品 1## 锆石年龄加权图;c.样品 TG-3 中锆石 U-Pb 年龄谐和图;d.样品 TG-3 锆石年龄加权图

表 3 图古日格角闪岩中锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of hornblende in Tugurige

| 点号 | 年龄(Ma) | $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | 2σ | $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ | $\epsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ | $t_{\text{DMI}}(\text{Ma})$ | $f_{\text{Lu/Hf}}$ |
|--------|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 1##-1 | 273 | 0.028 163 | 0.000 848 | 0.282 697 | 0.000 013 | 0.282 692 | -2.7 | 3.2 | 784 | -0.97 |
| 1##-2 | 273 | 0.027 582 | 0.000 835 | 0.282 648 | 0.000 011 | 0.282 644 | -4.4 | 1.5 | 851 | -0.97 |
| 1##-3 | 273 | 0.062 803 | 0.001 763 | 0.282 840 | 0.000 013 | 0.282 831 | 2.4 | 8.1 | 596 | -0.95 |
| 1##-4 | 273 | 0.035 875 | 0.001 088 | 0.282 719 | 0.000 012 | 0.282 713 | -1.9 | 3.9 | 757 | -0.97 |
| 1##-5 | 273 | 0.041 498 | 0.001 236 | 0.282 731 | 0.000 013 | 0.282 725 | -1.4 | 4.3 | 743 | -0.96 |
| 1##-6 | 273 | 0.037 576 | 0.001 129 | 0.282 717 | 0.000 012 | 0.282 711 | -1.9 | 3.9 | 760 | -0.97 |
| 1##-7 | 273 | 0.026 663 | 0.000 813 | 0.282 681 | 0.000 013 | 0.282 677 | -3.2 | 2.6 | 805 | -0.98 |
| 1##-8 | 273 | 0.029 553 | 0.000 909 | 0.282 675 | 0.000 013 | 0.282 671 | -3.4 | 2.4 | 815 | -0.97 |
| 1##-9 | 273 | 0.026 114 | 0.000 811 | 0.282 662 | 0.000 011 | 0.282 658 | -3.9 | 2.0 | 831 | -0.98 |
| 1##-10 | 273 | 0.030 634 | 0.000 930 | 0.282 684 | 0.000 013 | 0.282 679 | -3.1 | 2.7 | 803 | -0.97 |
| 1##-11 | 273 | 0.021 323 | 0.000 653 | 0.282 650 | 0.000 012 | 0.282 646 | -4.3 | 1.6 | 845 | -0.98 |
| 1##-12 | 273 | 0.020 151 | 0.000 613 | 0.282 656 | 0.000 009 | 0.282 653 | -4.1 | 1.8 | 835 | -0.98 |
| 1##-13 | 273 | 0.065 582 | 0.001 881 | 0.282 852 | 0.000 015 | 0.282 842 | 2.8 | 8.5 | 580 | -0.94 |
| 1##-14 | 273 | 0.029 505 | 0.000 880 | 0.282 680 | 0.000 012 | 0.282 676 | -3.2 | 2.6 | 807 | -0.97 |
| 1##-15 | 273 | 0.023 300 | 0.000 701 | 0.282 597 | 0.000 012 | 0.282 593 | -6.2 | -0.3 | 920 | -0.98 |

注: $\epsilon_{\text{Hf}}(0) = [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - 1] \times 10^4$; $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1\} \times 10^4$; $t_{\text{DMI}} = 1/\lambda \times \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \}$; $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}-1}$; 其中, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s$ 为样品测定值, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.032 200$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282 772$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038 400$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283 250$; f_{CC} 、 f_s 、 f_{DM} 分别为大陆地壳、样品和亏损地幔的 $f_{\text{Lu/Hf}}$, t 为样品形成时间, $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$.

表 4 图古日格角闪石岩主量元素(%)、微量元素(10^{-6})和稀土元素(10^{-6})分析结果

Table 4 Major elements, trace elements and rare elements analyses of the Tugurige hornblende

| 样品 | 1# #-1 | 1# #-2 | 1# #-3 | 1# #-4 | 1# #-5 | 1# #-6 | 样品 | 1# #-1 | 1# #-2 | 1# #-3 | 1# #-4 | 1# #-5 | 1# #-6 |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 43.46 | 43.54 | 45.30 | 45.29 | 46.30 | 43.33 | Lu | 0.45 | 0.42 | 0.39 | 0.35 | 0.34 | 0.45 |
| Al ₂ O ₃ | 16.15 | 17.57 | 15.84 | 11.02 | 10.87 | 15.52 | REE | 156.33 | 141.74 | 151.56 | 113.23 | 113.91 | 165.51 |
| TFe ₂ O ₃ | 14.22 | 14.01 | 13.91 | 13.99 | 13.34 | 15.14 | LREE | 134.48 | 121.60 | 128.67 | 91.90 | 93.74 | 140.37 |
| MgO | 7.59 | 6.26 | 7.43 | 11.89 | 11.73 | 7.93 | HREE | 21.85 | 20.14 | 22.89 | 21.33 | 20.17 | 25.14 |
| CaO | 9.34 | 9.44 | 9.90 | 11.35 | 11.10 | 10.25 | δEu | 0.74 | 0.83 | 0.77 | 0.76 | 0.79 | 0.83 |
| Na ₂ O | 2.10 | 2.29 | 2.43 | 1.88 | 1.86 | 2.20 | LREE/HREE | 6.15 | 6.04 | 5.62 | 4.31 | 4.65 | 5.58 |
| K ₂ O | 2.36 | 2.11 | 1.37 | 0.99 | 0.97 | 1.73 | (La/Yb) _N | 4.70 | 4.38 | 4.97 | 3.41 | 3.95 | 4.67 |
| MnO | 0.21 | 0.19 | 0.21 | 0.20 | 0.20 | 0.21 | (La/Sm) _N | 1.66 | 1.66 | 1.42 | 1.05 | 1.16 | 1.43 |
| TiO ₂ | 1.52 | 1.49 | 1.47 | 1.89 | 1.85 | 1.67 | (Gd/Lu) _N | 1.95 | 1.87 | 2.49 | 2.52 | 2.41 | 2.34 |
| P ₂ O ₅ | 0.44 | 0.50 | 0.39 | 0.05 | 0.05 | 0.36 | V | 317 | 290 | 289 | 439 | 480 | 368 |
| LOI | 2.56 | 2.54 | 1.72 | 1.42 | 1.67 | 1.62 | Cr | 124.0 | 63.2 | 94.2 | 272.0 | 268.0 | 87.2 |
| Total | 99.95 | 99.94 | 99.97 | 99.97 | 99.94 | 99.96 | Co | 37.8 | 30.7 | 38.5 | 56.0 | 53.9 | 46.1 |
| Mg [#] | 51.39 | 46.95 | 51.41 | 62.74 | 63.53 | 50.92 | Ni | 21.3 | 18.8 | 15.8 | 35.3 | 35.1 | 15.9 |
| M/F | 1.04 | 0.87 | 1.04 | 1.66 | 1.72 | 1.02 | Ga | 33.0 | 33.3 | 23.6 | 17.6 | 17.2 | 24.8 |
| La | 20.0 | 18.3 | 19.7 | 12.5 | 13.7 | 21.4 | Rb | 93.5 | 105.0 | 37.4 | 20.2 | 16.5 | 55.3 |
| Ce | 58.8 | 52.2 | 52.0 | 34.8 | 36.5 | 56.1 | Sr | 576 | 882 | 569 | 295 | 249 | 573 |
| Pr | 8.91 | 7.74 | 8.04 | 5.74 | 5.80 | 8.90 | Y | 35.2 | 32.1 | 31.1 | 29.1 | 27.8 | 34.3 |
| Nd | 37.4 | 34.6 | 38.1 | 29.5 | 28.5 | 42.2 | Ba | 303 | 540 | 710 | 1105 | 239 | 497 |
| Sm | 7.57 | 6.93 | 8.70 | 7.51 | 7.40 | 9.41 | Pb | 9.64 | 13.00 | 6.14 | 4.47 | 4.70 | 6.64 |
| Eu | 1.80 | 1.83 | 2.13 | 1.85 | 1.84 | 2.46 | Th | 2.54 | 2.89 | 2.23 | 1.50 | 3.01 | 2.41 |
| Gd | 7.06 | 6.32 | 7.82 | 7.10 | 6.58 | 8.47 | U | 0.72 | 0.91 | 0.86 | 0.45 | 0.97 | 0.89 |
| Tb | 1.15 | 1.05 | 1.27 | 1.16 | 1.14 | 1.42 | Nb | 6.55 | 6.27 | 6.03 | 5.34 | 5.49 | 6.74 |
| Dy | 5.87 | 5.32 | 6.39 | 6.13 | 6.01 | 6.89 | Ta | 0.284 | 0.266 | 0.320 | 0.325 | 0.365 | 0.320 |
| Ho | 1.12 | 1.05 | 1.14 | 1.10 | 1.00 | 1.24 | Zr | 116.0 | 152.0 | 96.2 | 60.1 | 67.0 | 115.0 |
| Er | 3.27 | 3.11 | 3.13 | 2.93 | 2.69 | 3.50 | Hf | 3.64 | 4.20 | 3.49 | 2.67 | 2.93 | 3.89 |
| Tm | 0.51 | 0.47 | 0.47 | 0.44 | 0.41 | 0.53 | La/Sm | 2.64 | 2.64 | 2.26 | 1.66 | 1.85 | 2.27 |
| Yb | 2.87 | 2.82 | 2.67 | 2.47 | 2.34 | 3.09 | Sr/Nd | 15.40 | 25.49 | 14.93 | 10.00 | 8.74 | 13.58 |

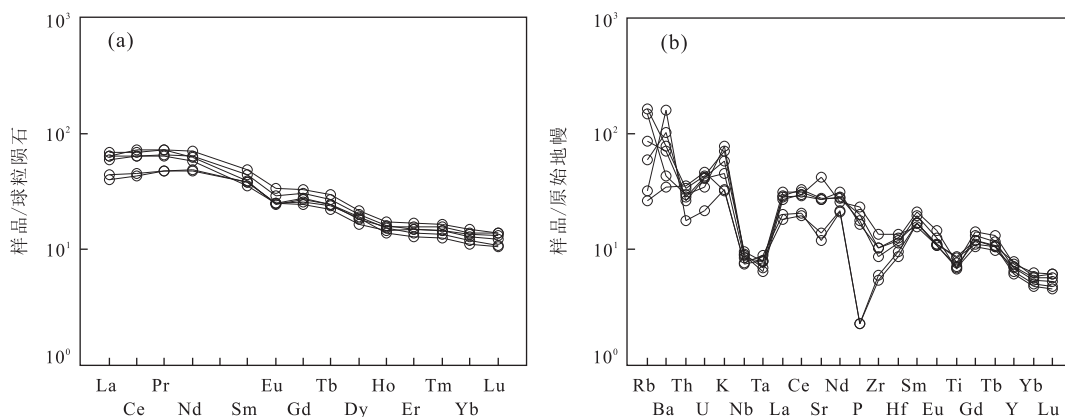


图 7 图古日格角闪石岩稀土元素配分模式(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace element patterns(b) for the Tugurige hornblende

图 a 球粒陨石值据 Boynton(1984); 图 b 原始地幔值据 Sun and McDonough(1989)

和微量元素结果及特征值列于表 4, 测试样品主量元素与角闪石电子探针分析结果近一致, 其特征显示贫 SiO₂、Na₂O、K₂O, 富 Al₂O₃、TFe₂O₃、MgO、CaO. 样品具有较低 SiO₂ 含量, 为 43.33%~46.30%, 平均值为 44.54%, 属于超基性岩. Na₂O 含量为 1.86%~2.43%, K₂O 含量为 0.97%~2.36%, 全碱含量为 3.80%~4.46%, Na₂O/K₂O 比值为

0.89~1.91. 岩石具有高的 TFe₂O₃ (13.34%~14.22%) 含量和 MgO (7.43%~11.89%) 含量, Mg[#] 值为 46.95~63.53, 样品的 M/F 比值为 0.87~1.72, 属于铁质基性岩类, 有利于形成钒钛磁铁矿矿床. 另外岩石具有高的 Al₂O₃ (10.87%~17.57%) 和 CaO (9.34%~11.35%) 值, MnO 值为 0.19%~0.21%, TiO₂ 值为 1.49%~1.89%, P₂O₅ 值为 0.05%~

0.44%。

图古日格角闪石岩稀土元素配分曲线为右倾型(图 7a), 具有较低的稀土元素总量(REE)为 $113.58 \times 10^{-6} \sim 165.96 \times 10^{-6}$, 是球粒陨石的 10 倍以上, LREE/HREE 值为 4.24~6.03, $(La/Yb)_N$ 值为 3.41~4.97, 轻稀土元素略富集。 δEu 值为 0.74~0.83, 表现为弱的 δEu 负异常, 可能是岩体形成过程中少量长石分离结晶作用所致。

图古日格角闪石岩原始地幔标准化微量元素蛛网图中显示(图 7b), 不同样品具有近一致的配分曲线, 表明其源区相同, 和原始地幔相比明显富集大离子亲石元素(Rb、Ba、K)而高场强元素 Nb、Ta 和 Ti 相对亏损, Th、U 同样显示出相对亏损。

4 讨论

4.1 角闪石岩形成时代

目前没有对研究区内角闪石岩研究的报道。本次对采自乌拉特中旗图古日格地区的两块角闪石岩标本(1# 和 TG-3)中锆石岩相学和 LA-ICP-MS 测年结果分析表明, 锆石具有岩浆成因的韵律环带结构, Th/U 比值为 0.30~2.70, 均显示其岩浆结晶成因, 所测数据点均分布于谐和线上, 两个样品的 $^{206}Pb/^{238}U$ 数据的加权平均年龄分别为 273.5 ± 1.3 Ma 和 274.4 ± 4.3 Ma, 在误差范围内完全一致, 可以确定角闪石岩的侵位时代为早二叠世晚期。前人研究表明本区存在广泛的早、中二叠世岩浆事件, 乌拉特中旗克布岩体(埃达克岩)中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 291 ± 4 Ma(罗红玲等, 2007); 乌兰地区含石榴石花岗岩的 SHRIMP U-Pb 年龄为 256 ± 2 Ma(张青伟等, 2011); 温更地区北七哥陶辉长岩体 SHRIMP U-Pb 年龄为 269 ± 8 Ma(赵磊等, 2011); 德尔斯地区黑云母二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 279 ± 3 Ma、 266 ± 3 Ma(王挽琼等, 2012); 温根 A 区镁铁-超镁铁质岩体 SHRIMP U-Pb 年龄为 285 ± 2 Ma(王倩, 2010); 乌梁斯太 A 型花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄为 277 ± 3 Ma(罗红玲等, 2009)。以上研究表明该区存在广泛的早、中二叠世岩浆侵入事件, 且分布较广。

4.2 角闪石的成因

角闪石岩在岩石学分类中属于超基性岩范围, 但目前为止报道有限, 仅在内蒙大乃林沟地区有角闪石岩的报道(王玉往等, 2000)。图古日格角闪石岩中的角闪石属于钙质角闪石, 内蒙大乃林沟角闪石

属于铁普通角闪石, 与内蒙地区大乃林沟角闪石岩中的角闪石相比, Al_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 和 TiO_2 含量明显偏高, 而 $TFeO$ 、 MnO 的含量明显偏低, SiO_2 、 CaO 和 K_2O 的含量较为接近, 显示出完全不同的成因。姜常义和安三元(1984)曾系统讨论了火成岩中钙质角闪石的化学组成及其意义, 研究表明随着岩浆结晶温度与压力的升高, 钙质角闪石的 SiO_2 含量降低, Al、Ti 和 $K_2O + Na_2O$ 的含量增加; 壳源 Al_2O_3 的含量一般不超过 10%, 而幔源一般不低于 10%; 幔源角闪石的结构式中 $Si/(Si+Ti+Al)$ 比值不超过 0.765, 而壳源不低于 0.775; Ca 在角闪石中的含量稳定, 与岩浆的温度、压力及全岩的化学组成物明显相关, 一般 $Ca/(Ca+Mg+Fe)$ 比值在 0.26~0.31, 图古日格角闪石中 SiO_2 含量较低, Al、Ti 和 $K_2O + Na_2O$ 的含量较高, 显示较高的结晶温度与压力, Al_2O_3 含量为 10.87%~13.58% 显示其幔源的特点, $Si/(Si+Ti+Al)$ 比值为 0.700~0.755 同样显示其幔源的特点。在角闪石 Al-Si 成因判别图解(图 8)中样品均落入幔源角闪石区, 以上分析结果表明, 图古日格角闪石电子探针分析结果显示其具有地幔岩石成因的特点。

4.3 岩浆源区

主量元素分析表明角闪石岩全岩贫 SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O , 富 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 和 CaO , 以 60~71 作为未分异的初始岩浆 $Mg^\#$ (Langmuir *et al.*, 1977), 岩石 $Mg^\# = 100 \times Mg^{2+}/(Mg^{2+} + TFe^{2+})$ 值为 46.59~63.53, 表明幔源岩浆经历了不同程度的结晶分异作用或有壳源成分的混入。如图

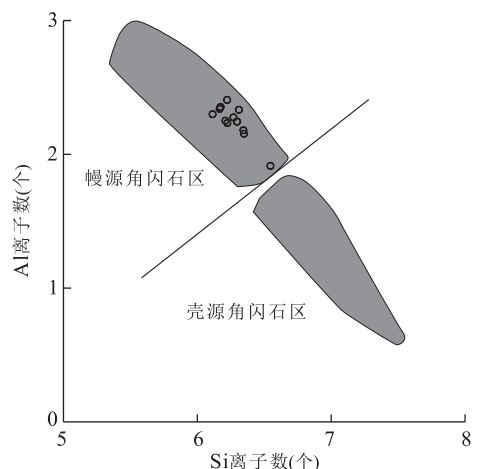


图 8 角闪石 Al-Si 图解

Fig. 8 Al-Si Diagram of crystal-chemical genesis of hornblende

图据姜常义和安三元(1984)修改

7a,7b 所示,其具有样品富集 LREE 和大离子亲石元素 Rb、Ba 和 K,而高场强元素 Nb、Ta、Ti、Zr、Hf 相对亏损的地球化学特征.Nb、Ta 的亏损可能由于地壳的混染作用或是源区经历了俯冲过程中的流体交代作用.一般认为高的 La/Sm 比值(>4.5)指示了地壳物质的混染,角闪石岩的 La/Sm 比值为 1.66~2.64,表明地壳混染程度低.中上地壳 U、Th 含量较高(Taylor and McLennan, 1985),这些物质加入会造成 U、Th 含量的升高,而图古日格角闪石岩显示 U、Th 的相对亏损,以上均说明地壳物质的混染较弱.6 件角闪石岩具有低的 Nb/Ce 比值(0.11~0.15)和 Nb/La 比值(0.31~0.43),比原始地幔、平均地壳和平均下地壳的 Nb/Ce 比值(0.40, 0.33,0.39)和 Nb/La(1.02,0.69,0.83)(Taylor and McLennan,1985)还要低,岩体高场强元素地球化学特征反映其源区特征而非地壳混染作用.在 Th/Yb-Nb/Yb 图解中(图 9a),样品均偏离 MORB-OIB 演化线,暗示源区受俯冲组分影响(Pearce, 2008);在 Ba/Th-Th/Nb 图解中(图 9b),样品显示含水流体加入的趋势;在 Nb/Zr-Th/Zr 图解中(图 9c),样品投点位于流体俯冲交代和熔体俯冲交代之间,以上特征表明大量含水流体和熔体交代了上覆地幔源区,从而形成富水的角闪石岩.

图古日格角闪岩中锆石的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值为 0.282 597~0.282 552,对应的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 -0.3~8.5,显示出弱富集至弱亏损的特征(图 10),表明其源区中亏损地幔是其主要组成部分,并与兴蒙造山带东段花岗岩类具有的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值相近(Yang *et al.*, 2006),锆石 Hf 单阶段模式年龄(T_{DM1})为 580~920 Ma,均值为 782 Ma,以及弱的富集特征表明有富集地幔或下地壳物质的混入(吴福元等,2007).区域内温更地区北七哥陶橄榄辉长岩(269±8 Ma)和

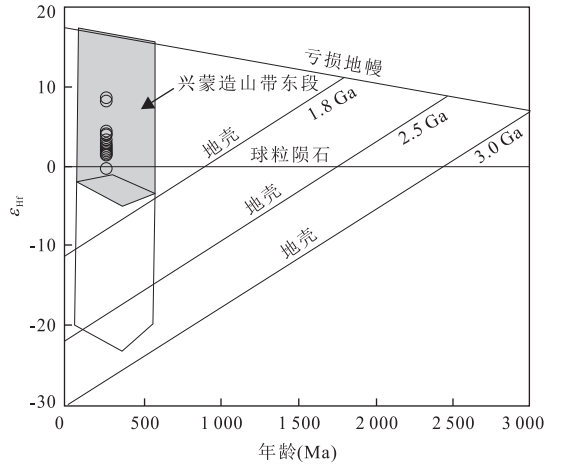


图 10 图古日格角闪石岩锆石 $\epsilon_{Hf}(t)-t$ 图解

Fig.10 $\epsilon_{Hf}(t)-t$ diagram of Tugurige hornblende

据 Yang *et al.*(2006)

角闪辉长岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值分别为 -8.8 和 -8.9(赵磊等,2011),表明本区有富集地幔的存在.因此,本区角闪石岩的岩浆源区主要为亏损的软流圈地幔,但含有富集的岩石圈地幔物质的贡献,其成因机制类似于华北太行山地区的新生代玄武岩(Tang *et al.*, 2006),上涌的软流圈地幔岩浆与富集的岩石圈地幔发生相互作用,从而具有富集地幔的特征.而这种富集地幔可能是由于古亚洲洋闭合、俯冲的大洋板片脱水、熔融以及释放的含水流体和熔体交代上覆岩石圈地幔而形成的(汤艳杰等,2014).

4.4 构造环境

古亚洲洋闭合时间目前存在很大分歧,部分学者认为闭合时间为晚泥盆世一早石炭世(Tang *et al.*, 1990;邵济安,1991;唐克东,1992;徐备和陈斌,1997),而另一部分学者认为其闭合时间应为二叠纪晚期(王荃等,1991;Windley,1993;陈斌等,2001;Xiao *et al.*, 2003).出现以上分歧的原因是由于在兴蒙造山带不

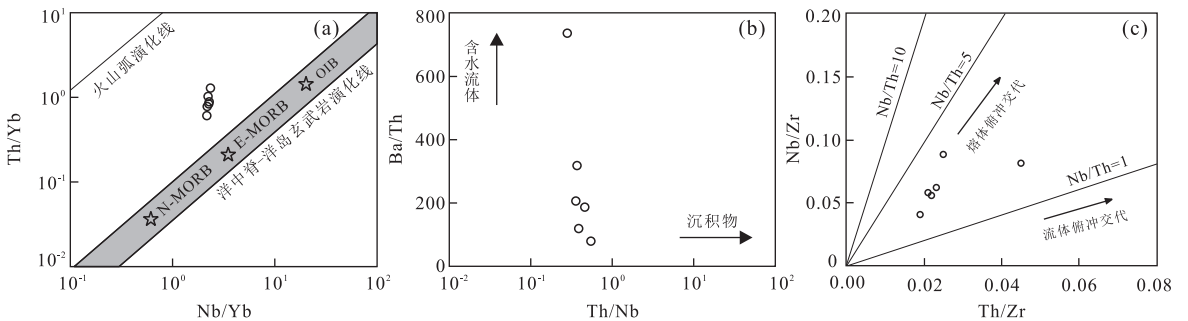


图 9 图古日格角闪石岩 Th/Yb-Nb/Yb 图解(a)、Ba/Th-Th/Nb 图解(b)和 Nb/Zr-Th/Zr 图解(c)

Fig.9 Th/Yb-Nb/Yb, Ba/Th-Th/Nb and Nb/Zr-Th/Zr diagrams of Tugurige hornblende

图 a 据 Pearce(2008);图 b 据 Hanyu *et al.*(2006);图 c 据 Woodhead *et al.*(2001)

同地方发现了不同时代的蛇绿岩。

本次研究角闪石岩样品在 Ti-Zr 图解中样品均落入板内玄武岩区域中(图 11),样品 Sr/Nd 比值为 8.74~25.49,均值为 13.58,非常接近板内岩浆 Sr/Nd 比值 16(Rudnick, 1995),而明显低于汇聚板块边缘弧岩浆 Sr/Nd 比值 32(Rudnick, 1995)。以上特征表明图古日格角闪石岩应形成于后碰撞板内伸展环境。

Liegéois(1998)认为高钾钙碱性、橄榄玄粗质、强过铝质 S 型和碱性—偏碱性花岗岩存在与是否是判别后碰撞岩浆岩活动的重要依据。大青山哈拉合少高钾钙碱性花岗岩 TIMS 年龄为 261 Ma(赵庆英等, 2007),巴音珠日和高钾钙碱性岩体 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 265 ± 2 Ma(罗红玲等, 2013),温都尔庙南—铁沙盖高钾钙碱性花岗岩体 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 271.8 ± 2.4 Ma; 271.4 ± 1.3 Ma; 268.7 ± 1.3 Ma(王婉琼等, 2013),东升庙强过铝质 S 型花岗岩的独居石 Th-U-Pb 年龄为 286~276 Ma(王鑫琳, 2007),乌梁斯太北部温更辉长岩锆石 SHRIMP 年龄为 272 Ma(赵磊等, 2008),温更地区北七哥陶辉长岩岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 269 ± 8 Ma(赵磊等, 2011),白云鄂博矿区辉长岩的锆石 SHRIMP 年龄为 259 Ma(张宗清等, 2003),内蒙林西县闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 286 ± 1 Ma(李益龙等, 2012),白音乌拉—东乌珠穆沁旗带的碱性花岗岩 Rb-Sr 年龄为 276~286 Ma(洪大卫等, 1994),乌梁斯太 A 型花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 277 ± 3 Ma(罗红玲等, 2009),锡林浩特据 A 型花岗岩的地球化学特征的流纹岩、花岗岩的 SHRIMP 年龄分别为 279 ± 3 Ma、 276 ± 2 Ma(Shi *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2008),乌拉特中旗克布壳源埃达克岩体 SHRIMP U-Pb 年龄为 $291 \pm$

4 Ma(罗红玲等, 2007)。以上岩体均在 261~286 Ma 的短暂时间内侵位形成,而与俯冲作用相关的岩浆岩往往具有较长的演化历史,岩性的差异主要与岩浆源区、结晶分离程度和同化混染程度等作用有关。以上证据说明,图古日格角闪石岩、基性—超基性岩、高钾钙碱性岩体、过铝质 S 型花岗岩和 A 型花岗岩体属于同期侵位,具有后碰撞岩浆岩的多样性、巨量岩浆岩侵位的岩石组合特征。

索伦、贺根山蛇绿岩带中二叠纪岩浆岩里存在大量古老继承锆石,表明研究区内在二叠纪时期不存在大规模的洋盆(Miao *et al.*, 2008; Jian *et al.*, 2010)。在内蒙古东乌珠穆沁旗满都胡宝拉格地区发现的早—中二叠世华夏植物群,同样表明古亚洲洋的闭合时间应在早二叠世之前(周志广等, 2010)。李朋武等(2012)通过对苏尼特左旗白音乌拉及敖汉旗安庆沟乡晚石炭世古地磁研究显示二者具有相似的古地磁方向,并认为内蒙古中部在晚石炭世—早二叠世已和华北板块发生拼贴,Zhao *et al.*(2013)对内蒙古中部泥盆纪—二叠纪地层研究表明,该区自晚泥盆世已与华北板块处于同一纬度,说明二者可能已发生碰撞。邵济安等(2014)通过对内蒙中部构造古地理图的编制,结合早二叠世沉积岩相、古地理、生物组合等的综合研究分析,认为中亚陆块和华北克拉通之间在晚古生代存在的是陆壳基底之上发育的陆表海和裂隙槽,而非大开大合的大洋(邵济安等, 2015)。综上所述,古亚洲洋在该区闭合时间应在二叠纪之前(300 Ma 左右),而图古日格角闪石岩的形成时代为 274 Ma,其形成于古亚洲洋闭合有关的后碰撞构造环境。

图古日格角闪石岩形成于早二叠世,结合区域构造演化,笔者认为其形成于碰撞后伸展的构造环境。岩体的形成过程可以概括为,早期古亚洲洋俯冲阶段,俯冲板片脱水熔融交代岩石圈地幔,形成富集岩石圈地幔;早二叠世之前,古亚洲洋发生闭合,深部洋壳继续向下俯冲,导致俯冲板片断离,深部软流圈沿板片窗上涌发生减压熔融,上涌的岩浆与富集的岩石圈地幔发生相互作用、形成具有富集地幔特征岩浆,而后经历分离结晶作用,最终侵位形成图古日格角闪石岩(图 12)。

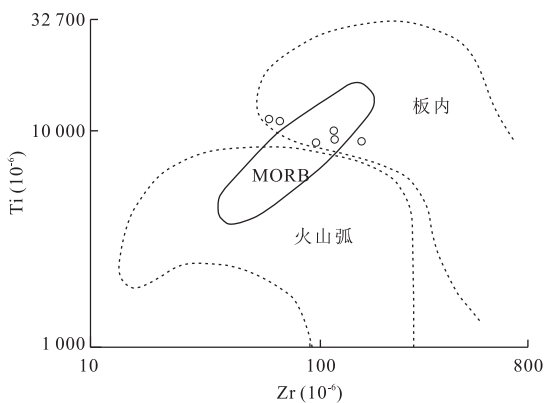


图 11 图古日格角闪石岩 Ti-Zr 图解

Fig.11 Ti-Zr diagram of Tugurige hornblende

5 结论

(1)两件图古日格角闪石岩样品锆石 LA-ICP-MS 加权平均年龄分别为 273.5 ± 1.3 Ma(MSWD=

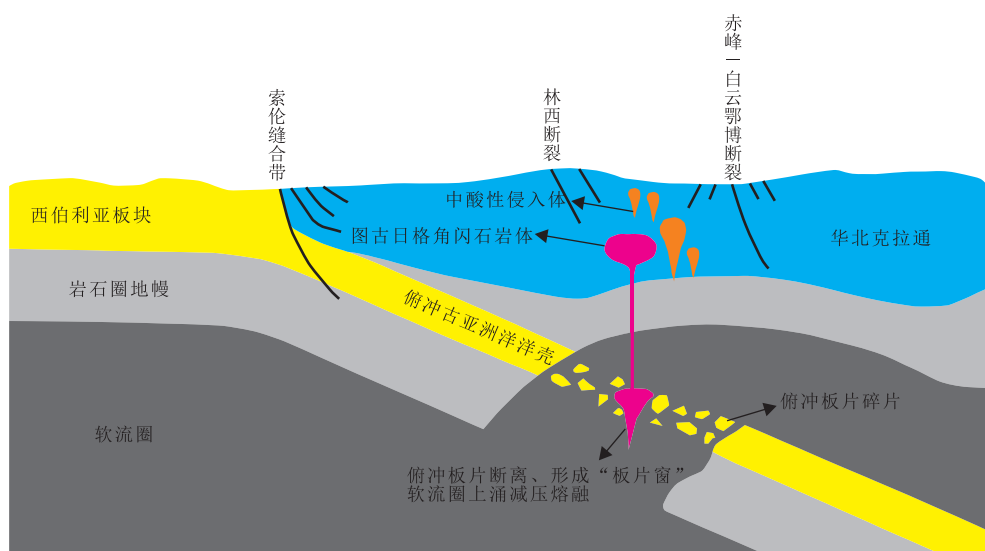


图 12 图古日格角闪岩形成构造模式

Fig.12 Structure model diagram of Tugurige hornblende

0.48)和 274.4 ± 4.3 Ma (MSWD=0.041), 均属于早二叠世。

(2) 13 个阳离子为基准的计算表明, 角闪石属于钙质角闪石, 并具有地幔角闪石的特点。图古日格角闪石岩主量元素显示贫 SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O , 富 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 、 CaO 。岩石富集轻稀土元素和大离子亲石元素 (Rb、Ba、K), 相对亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 及 Th 和 U。角闪石岩中锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.282\ 597 \sim 0.282\ 552$, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-0.3 \sim 8.5$, 锆石 Hf 单阶段模式年龄 (t_{DM1}) 为 $580 \sim 920$ Ma。研究表明其源区主要为亏损地幔, 有少量早期流体交代的岩石圈富集地幔组分的加入。

(3) 在 Ti-Zr 图解中样品均落入板内玄武岩区域中, 样品 Sr/Nd 均值为 13.58, 接近板内岩浆 Sr/Nd 比值, 笔者结合区内研究成果, 认为图古日格角闪石岩应形成于碰撞后的伸展环境。

References

All Members of the IMA-CNMMN Amphibole Professional Committee, 2001. Amphibole Nomenclature—International Association of Mineralogy New Mineral and Mineral Named Committee Hornblende Professional Committee's Report. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(1): 84–100 (in Chinese).

Blichert-Toft, J., Catherine Chauvel, F., Albarède, F., 1997. Separation of Hf and Lu for High-Precision Isotope Analysis of Rock Samples by Magnetic Sector-Multiple

Collector ICP-MS. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127(3): 248–260. doi:10.1007/s004100050278

Boynton, W.V., 1984. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., ed., Rare Earth Elements Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 63–144. doi:10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3

Chen, B., Zhao, G. C., Wilde, S., 2001. Subduction- and Collision-Related Granitoids from Southern Sonidzuoqi, Inner Mongolia: Isotopic Ages and Tectonic Implications. *Geological Review*, 47(4): 361–364 (in Chinese with English abstract).

Fisher, C.M., Vervoort, J.D., Hanchar, J.M., 2014. Guidelines for Reporting Zircon Hf Isotopic Data by LA-MC-ICPMS and Potential Pitfalls in the Interpretation of These Data. *Chemical Geology*, 363: 125–133. doi:10.1016/j.chemgeo.2013.10.019

Hanyu, T., Tatsumi, Y., Nakai, S., et al., 2006. Contribution of Slab Melting and Slab Dehydration to Magmatism in the NE Japan Arc for the Last 25 Myr: Constraints from Geochemistry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(8): 1–29.

Hong, D.W., Huang, H.Z., Xiao, Y.J., et al., 1994. The Permian Alkaline Granites in Central Inner Mongolia and Their Geodynamic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 68(3): 219–230 (in Chinese with English abstract).

Hu, Z.C., Gao, S., Liu, Y.S., et al., 2008a. Signal Enhancement in Laser Ablation ICP-MS by Addition of Nitrogen in the Central Channel Gas. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23(8): 1093–1101.

Hu, Z.C., Liu, Y.S., Gao, S., et al., 2008b. A Local Aerosol

- Extraction Strategy for the Determination of the Aerosol Composition in Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23(9): 1192–1203. doi: 10.1039/B803934H
- Hu, Z.C., Liu, Y.S., Gao, S., et al., 2012a. A “Wire” Signal Smoothing Device for Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Analysis. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 78: 50–57. doi: 10.1016/j.sab.2012.09.007
- Hu, Z.C., Liu, Y.S., Gao, S., et al., 2012b. 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): 1391–1399. doi: 10.1039/C2JA30078H
- Jian, P., Liu, D.Y., Kröner, A., et al., 2010. Evolution of a Permian Intraoceanic Arc-Trench System in the Solonker Suture Zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia. *Lithos*, 118(1–2): 169–190. doi: 10.1016/j.lithos.2010.04.014
- Jiang, C.Y., An, S.Y., 1984. On Chemical Characteristics of Calcic Amphiboles from Igneous Rock and Their Petrogenesis Significance. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 4(3): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Langmuir, C.H., Bender, J.F., Bence, A.E., et al., 1977. Petrogenesis of Basalts from the FAMOUS Area: Mid-Atlantic Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 36(1): 133–156. doi: 10.1016/0012–821X(77)90194–7
- Leake, B.E., 1997. Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineralogical Magazine*, 61(405): 295–321.
- Li, B.L., Sun, Y.G., Chen, G.J., et al., 2016. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopic Composition and Its Geological Implication of the Fine-Grained Syenogranite in Dong’an Goldfield from the Lesser Xing’an Mountains. *Earth Science*, 41(1): 1–16 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.Y., Gao, L.M., Sun, G.H., et al., 2007. Shuangjingzi Middle Triassic Syn-Collisional Crust-Derived Granite in the East Inner Mongolia and Its Constraint on the Timing of Collision between Siberian and Sino-Korean Paleo-Plates. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565–582 (in Chinese with English abstract).
- Li, P.W., Zhang, S.H., Gao, R., et al., 2012. New Upper Carboniferous-Lower Permian Paleomagnetic Results from the Central Inner Mongolia and Their Geological Implications. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(Suppl.1): 423–434, 440 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.L., Zhou, H.W., Xiao, W.J., et al., 2012. Superposition of Paleo-Asian and West-Pacific Tectonic Domains in the Eastern Section of the Solonker Suture Zone: Insights from Petrology, Geochemistry and Geochronology of Deformed Diorite in Xar Moron Fault Zone, Inner Mongolia. *Earth Science*, 37(3): 433–450 (in Chinese with English abstract).
- Liegéois, J. P., 1998. Some Words on the Post-Collisional Magmatism. *Lithos*, 45: 15–17.
- Liu, Y., Gao, S., Hu, Z., et al., 2009. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571.
- Ludwig, K.R., 2003. User’s Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 4: 70.
- Luo, H. L., Wu, T. R., Li, Y., 2007. Geochemistry and SHRIMP Dating of the Kebu Massif from Wulatezhongqi, Inner Mongolia: Evidence for the Early Permian Under Palting Beneath the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 755–766 (in Chinese with English abstract).
- Luo, H.L., Wu, T.R., Zhao, L., 2009. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Wuliangsitai A-Type Granite on the Northern Margin of the North China Plate and Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 515–526 (in Chinese with English abstract).
- Luo, H. L., Wu, T. R., Zhao, L., et al., 2013. Geochemical Characteristics of Bayinzhurhe Pluton and Its Tectonic Significance, Bayan Obo, Inner Mongolia. *Geological Journal of China Universities*, 19(1): 123–132 (in Chinese with English abstract).
- Miao, L.C., Fan, W.M., Liu, D.Y., et al., 2008. Geochronology and Geochemistry of the Hegenshan Ophiolitic Complex: Implications for Late-Stage Tectonic Evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5–6): 348–370. doi: 10.1016/j.jseae.2007.11.005
- Pearce, J. A., 2008. Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. *Lithos*, 100(1–4): 14–48. doi: 10.1016/j.lithos.2007.06.016

- Rudnick, R. L., 1995. Making Continental Crust. *Nature*, 378 (7): 571–578.
- Rudnick, R. L., Gao, S., Ling, W. L., et al., 2004. Petrology and Geochemistry of Spinel Peridotite Xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China Craton. *Lithos*, 77 (1–4): 609–637. doi:10.1016/j.lithos.2004.03.033
- Shao, J. A., 1991. Crustal Evolution of the Central-Northern Margin of the Sino-Korean Plate. Peking University Press, Beijing (in Chinese).
- Shao, J. A., Tang, K. D., He, G. Q., 2014. Early Permian Tectono-Palaeogeographic Reconstruction of Inner Mongolia, China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1858–1866 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Tian, W., Zhang, J. H., 2015. Early Permian Cumulates in Northern Margin of North China Craton and Their Tectonic Significances. *Earth Science*, 40 (9): 1441–1457 (in Chinese with English abstract).
- Shen, S. Z., Zhang, H., Shang, Q. H., et al., 2006. Permian Stratigraphy and Correlation of Northeast China: A Review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26 (3–4): 304–326. doi:10.1016/j.jseas.2005.07.007
- Shi, G. H., Miao, L. C., Zhang, F. Q., et al., 2004. Emplacement Age and Tectonic Implications of the Xilinhot A-Type Granite in Inner Mongolia, China. *Chinese Science Bulletin*, 49(7): 723–729.
- Sun, L. X., Zhao, F. Q., Wang, H. C., et al., 2013. Zircon U-Pb Geochronology of Metabase Rocks from the Baoyintu Block in the Langshan Area, Inner Mongolia, and Its Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 87 (2): 197–207 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345.
- Tang, K. D., 1990. Tectonic Development of Paleozoic Fold-belts at the North Margin of the Sino-Korean Craton. *Tectonics*, 9(2): 249–260.
- Tang, K. D., 1992. Evolution of Fold Belt Tectonic and Metallogenic Regularities in North Sino-Korean Plate. Peking University Press, Beijing, 112–243 (in Chinese).
- Tang, Y. J., Zhang, H. F., Ying, J. F., 2014. Genetic Significance of Triassic Alkali-Rich Intrusive Rocks in the Yinshan and Neighboring Areas. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 2031–2040 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y. J., Zhang, H. F., Ying, J. F., 2006. Asthenosphere-Lithospheric Mantle Interaction in an Extensional Regime: Implication from the Geochemistry of Cenozoic Basalts from Taihang Mountains, North China Craton. *Chemical Geology*, 233(3–4): 309–327.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publication, Oxford.
- Tong, Y., Hong, D. W., Wang, T., et al., 2010. Spatial and Temporal Distribution of Granitoids in the Middle Segment of the Sino-Mongolian Border and Its Tectonic and Metallogenic Implications. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(3): 395–412 (in Chinese with English abstract).
- Vervoort, J. D., Patchett, P. J., 1996. Behavior of Hafnium and Neodymium Isotopes in the Crust: Constraints from Precambrian Crustally Derived Granites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(19): 3717–3733.
- Wang, Q., 2010. Petrogenesis and Magma Source of Wengen A-Magmatic Ultramafic Intrusion, Inner Mongolia, China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Liu, X. Y., Li, J. Y., 1991. Plate Tectonics between Cathaysia and Angaraland in China. Peking University Press, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. Q., Liu, Z. H., Wang, X. A., et al., 2012. SHRIMP U-Pb Dating of the Zircon from the Hercynian Biotite Monzonitic Granites in Urad Zhongqi, Inner Mongolia, and Its Geological Significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(6): 1771–1782 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. Q., Xu, Z. Y., Liu, Z. H., et al., 2013. Early-Middle Permian Tectonic Evolution of the Central-Northern Margin of the North China Craton: Constraints from Zircon U-Pb Ages and Geochemistry of the Granitoids. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 2987–3003 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. L., Zhang, C., Liu, S. W., et al., 2007. Electron Microprobe Dating of Monazite in Granite from Kanbao Area, Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 817–822 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. D., Sun, F. Y., Li, L., et al., 2015. Geochronology, Geochemistry, and Geological Implications of Late Carboniferous-Early Permian Mafic and Felsic Intrusive Rocks from Urad Zhongqi, Western Inner Mongolia. *Geological Magazine*, 152(6): 1057–1072.
- Wang, Y. W., Wang, J. B., Wang, L. J., 2000. The Petrologic Characteristics of Hornblendite in Danailingou, Inner Mongolia. *Geological Review*, 46(3): 301–306 (in Chinese with English abstract).
- Windley, B., 1993. Proterozoic Anorogenic Magmatism and Its Orogenic Connections. *Journal of the Geological Society*, 150: 39–50. doi:10.1144/gsjgs.150.1.0039

- Woodhead, J. D., Hergt, J. M., Davidson, J. P., et al., 2001. Hafnium Isotope Evidence for 'Conservative' Element Mobility during Subduction Zone Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3): 331—346. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.04.026
- Woodhead, J., Hergt, J., Shelley, M., et al., 2004. Zircon Hf Isotope Analysis with an Excimer Laser, Depth Profiling, Ablation of Complex Geometries, and Concomitant Age Estimation. *Chemical Geology*, 209(1—2): 121—135. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.04.026
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Hao, J., et al., 2003. Accretion Leading to Collision and the Permian Solonker Suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22(6): 288—308.
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Huang, B. C., et al., 2009. End-Permian to Mid-Triassic Termination of the Accretionary Processes of the Southern Altaids: Implications for the Geodynamic Evolution, Phanerozoic Continental Growth, and Metallogeny of Central Asia. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1189—1217.
- Xu, B., Charvet, J., Chen, Y., et al., 2013. Middle Paleozoic Convergent Orogenic Belts in Western Inner Mongolia (China): Framework, Kinematics, Geochronology and Implications for Tectonic Evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 23(4): 1342—1364. doi: 10.1016/j.gr.2012.05.015
- Xu, B., Chen, B., 1997. Structure and Evolution of the Paleozoic Orogenic Belt between North China Plate and Siberian Plate in the North Inner Mongolia. *Science in China (Series D)*, 27(3): 227—232 (in Chinese).
- Yang, J., Wu, F., Shao, J., et al., 2006. Constraints on the Timing of Uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3—4): 336—352.
- 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.
- Yuan, H. L., Wu, F. Y., Gao, S., et al., 2003. Laser Probe Zircon U-Pb and REE Composition Analysis of Cenozoic Intrusive in Northeast China. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511—1520 (in Chinese).
- Zhang, Q. W., Liu, Z. H., Chai, S. L., et al., 2011. Zircon U-Pb Dating of the Garnet-Bearing Granite from Wulan Area of Urad Zhongqi in Inner Mongolia and Its Geological Significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(3): 745—752 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. H., Zhang, H. F., Tang, Y. J., et al., 2008. Geochemistry of Permian Bimodal Volcanic Rocks from Central Inner Mongolia, North China: Implication for Tectonic Setting and Phanerozoic Continental Growth in Central Asian Orogenic Belt. *Chemical Geology*, 249(3—4): 262—281. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.01.005
- Zhang, Z. Q., Yuan, Z. X., Tang, S. H., et al., 2003. Age and Geochemistry of the Bayan Obo Ore Deposit. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhao, L., Wu, T. R., Luo, H. L., 2011. SHRIMP U-Pb Dating, Geochemistry and Tectonic Implications of the Beiqigetao Gabbros in Urad Zhongqi Area, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 3071—3082 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, L., Wu, T. R., Luo, H. L., et al., 2008. Petrology, Geochemistry and Tectonic Implications of the Wengeng Gabbros in Wulatezhongqi Area, Inner Mongolia. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 44(2): 201—211 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P., Chen, Y., Xu, B., et al., 2013. Did the Paleo-Asian Ocean between North China Block and Mongolia Block Exist during the Late Paleozoic? First Paleomagnetic Evidence from Central-Eastern Inner Mongolia, China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(5): 1873—1894.
- Zhao, Q. Y., Liu, Z. H., Wu, X. W., et al., 2007. Characteristics and Origin of Halaheshao Pluton in Daqingshan Region, Inner-Mongolia. *Journal of Mineral. Petrol.*, 27(1): 46—51 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z. G., Gu, Y. C., Liu, C. F., et al., 2010. Discovery of Early-Middle Permian Cathaysian Flora in Manduhubalage Area, Dong Ujimqin Qi, Inner Mongolia, China and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 21—25 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- IMA-CNMMN 角闪石专业委员会全体成员, 2001. 角闪石命名法——国际矿物学协会新矿物及矿物命名委员会角闪石专业委员会的报告. *岩石矿物学杂志*, 20(1): 84—100.
- 陈斌, 赵国春, Wilde, S., 2001. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及构造意义. *地质评论*, 47(4): 361—364.
- 洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君, 等, 1994. 内蒙古中部二叠纪碱性花

- 岗岩及其地球动力学意义.地质学报,68(3):219-230.
- 姜常义,安三元,1984.论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义.矿物岩石,4(3):1-9.
- 李碧乐,孙永刚,陈广俊,等,2016.小兴安岭东安金矿区细粒正长花岗岩 U-Pb 年龄、岩石地球化学、Hf 同位素组成及地质意义.地球科学,41(1):1-16.
- 李锦轶,高立明,孙桂华,等,2007.内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束.岩石学报,23(3):565-582.
- 李朋武,张世红,高锐,等,2012.内蒙古中部晚石炭世一早二叠世古地磁新数据及其地质意义.吉林大学学报(地球科学版),42(增刊1):423-434,440.
- 李益龙,周汉文,肖文交,等,2012.古亚洲构造域和西太平洋构造域在索伦缝合带东段的叠加:来自内蒙古林西县西拉木伦断裂带内变形闪长岩的岩石学、地球化学和年代学证据.地球科学,37(3):433-450.
- 罗红玲,吴泰然,李毅,2007.乌拉特中旗克布岩体的地球化学特征及 SHRIMP 定年:早二叠世华北克拉通底侵作用的证据.岩石学报,23(4):755-766.
- 罗红玲,吴泰然,赵磊,2009.华北板块北缘乌梁斯太 A 型花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及构造意义.岩石学报,25(3):515-526.
- 罗红玲,吴泰然,赵磊,等,2013.白云鄂博中二叠世巴音珠日和岩体地球化学特征及构造意义.高校地质学报,19(1):123-132.
- 邵济安,1991.中朝板块北缘中段地壳演化.北京:北京大学出版社.
- 邵济安,唐克东,何国琦,2014.内蒙古早二叠世构造古地理的再造.岩石学报,30(7):1858-1866.
- 邵济安,田伟,张吉衡,2015.华北克拉通北缘早二叠世堆晶岩及其构造意义.地球科学,40(9):1441-1457.
- 孙立新,赵凤清,王惠初,等,2013.内蒙古狼山地区宝音图地块变质基底的锆石 U-Pb 年龄及构造意义.地质学报,87(2):197-207.
- 唐克东,1992.中朝板块北侧褶皱带构造演化及成矿规律.北京:北京大学出版社,112-243.
- 汤艳杰,张宏福,英基丰,2014.阴山及邻区三叠纪富碱侵入岩的成因意义.岩石学报,30(7):2031-2040.
- 童英,洪大卫,王涛,等,2010.中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义.地球学报,31(3):395-412.
- 王倩,2010.内蒙古乌拉特中旗温根 A 区镁铁-超镁铁质岩体成因及岩浆源区讨论(硕士学位论文).北京:中国地质大学.
- 王荃,刘雪亚,李锦轶,1991.中国华夏与安加拉古陆间的板块构造.北京:北京大学出版社.
- 王挽琼,刘正宏,王兴安,等,2012.内蒙古乌拉特中旗海西期黑云母二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义.吉林大学学报(地球科学版),42(6):1771-1782.
- 王挽琼,徐仲元,刘正宏,等,2013.华北板块北缘中段早中二叠世的构造属性:来自花岗岩类锆石 U-Pb 年代学及地球化学的制约.岩石学报,29(9):2987-3003.
- 王鑫琳,张臣,刘树文,等,2007.河北康保地区花岗岩独居石电子探针定年.岩石学报,23(4):817-822.
- 王玉往,王京彬,王莉娟,2000.内蒙古大乃林沟角闪石岩岩石学特征.地质论评,46(3):301-306.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等,2007.Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用.岩石学报,23(2):185-220.
- 徐备,陈斌,1997.内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中生代造山带的结构及演化.中国科学:D 辑:地球科学,27(3):227-232.
- 袁洪林,吴福元,高山,等,2003.东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 与稀土元素成分分析.科学通报,48(14):1511-1520.
- 张青伟,刘正宏,柴社立,等,2011.内蒙古乌拉特中旗乌兰地区含石榴石花岗岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义.吉林大学学报(地球科学版),41(3):745-752.
- 张宗清,袁忠信,唐索寒,等,2003.白云鄂博矿床年龄和地球化学.北京:地质出版社.
- 赵磊,吴泰然,罗红玲,2011.内蒙古乌拉特中旗北七哥陶辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义.27(10):3071-3082.
- 赵磊,吴泰然,罗红玲,等,2008.内蒙古乌拉特中旗温更辉长岩类的岩石学、地球化学特征及其构造意义.北京大学学报(自然科学版),44(2):201-211.
- 赵庆英,刘正宏,吴新伟,等,2007.内蒙古大青山地区哈拉合少岩体特征及成因.矿物岩石,27(1):46-51.
- 周志广,谷永昌,柳长峰,等,2010.内蒙古东乌珠穆沁旗满都胡宝拉格地区早一中二叠世华夏植物群的发现及地质意义.地质通报,29(1):21-25.