中国科学: 地球科学 2017 年 第 47 卷 第 7 期: 804 ~ 817
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 花岗岩成因与成矿机制专题

造山带内微陆块地壳的增生与再造过程: 以额尔古纳地块为例

孙晨阳, 唐杰*, 许文良, 李宇, 赵硕

吉林大学地球科学学院, 长春 130061

* 通讯作者, E-mail: 893335234@qq.com

收稿日期: 2016-11-28; 接受日期: 2017-03-20; 网络版发表日期: 2017-04-01
国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0600403)和国家自然科学基金项目(批准号: 41330206)资助

摘要 系统总结并分析了近年来获得的额尔古纳地块中生代花岗岩的年代学、地球化学和Hf同位素数据, 以便从Hf同位素时空变异角度揭示额尔古纳地块陆壳增生及再造过程, 为造山带地壳演化提供证据. 基于花岗岩锆石U-Pb定年结果, 额尔古纳地块中生代花岗质岩浆作用至少可划分五个阶段: 早-中三叠世(249~237Ma)、晚三叠世(229~201Ma)、早-中侏罗世(199~171Ma)、晚侏罗世(155~149Ma)和早白垩世(145~125Ma). 其中, 前三个侵入阶段的花岗岩主要为I型花岗岩, 而后两个阶段为A型花岗岩, 反映中生代蒙古-鄂霍茨克大洋板块俯冲-碰撞-伸展过程导致额尔古纳地块陆壳由加厚向减薄变化的特征. 中生代花岗岩中锆石Hf同位素分析结果表明, 额尔古纳地块陆壳增生主要发生于中元古代及新元古代, 并且这些中生代花岗岩具有随时代变新$\varepsilon_{Hf}(t)$值逐渐升高、二阶段模式年龄(T_{DM2})逐渐下降的变化趋势, 揭示额尔古纳地块中生代不同期次花岗质岩浆的产生经历了从古老陆壳物质熔融至新增生陆壳物质熔融的变化过程. 此外, 锆石Hf同位素组成在空间上还具有随纬度增加$\varepsilon_{Hf}(t)$值逐渐下降、二阶段模式年龄(T_{DM2})逐渐升高的变化特征, 显示出研究区深部陆壳物质组成中古老陆壳成分由南向北增多的趋势. 而在同一纬度范围内, 锆石Hf同位素组成也存在差异. 这些结果表明额尔古纳地块深部陆壳在横向和垂向上均存在明显的不均一性. 综合上述特征, 本文提出了额尔古纳地块下部陆壳的结构模型.

关键词 造山带, 额尔古纳地块, 地壳增生与再造, 中生代, 花岗岩, Hf同位素

1 引言

广泛发育的长英质大陆地壳是地球区别于其他类地行星的重要标志(Campbell和Taylor, 1983; Rudnick, 1995; Jahn等, 2000a, 2000b, 2000c). 长久以来, 对于大陆地壳的结构、成分及其增生与再造过程的研究从未停止, 且一直是地球科学研究领域的核心与前沿. 尽管众多学者对于大陆地壳增生时间的研究已经基本达成共识, 即大陆地壳主体形成于太古代(Taylor和Mclennan, 1985; Jacobsen, 1988; DePaolo等, 1991; Hawkesworth和Kemp, 2006; Belousova等, 2010; Dhuime等, 2011, 2012), 但需要注意的是, 全球大陆组成应包括克拉通和造山

中文引用格式: 孙晨阳, 唐杰, 许文良, 李宇, 赵硕. 2017. 造山带内微陆块地壳的增生与再造过程: 以额尔古纳地块为例. 中国科学: 地球科学, 47: 804–817, doi: 10.1360/N072016-00255
英文引用格式: Sun C Y, Tang J, Xu W L, Li Y, Zhao S. 2017. Crustal accretion and reworking processes of micro-continental massifs within orogenic belt: A case study of the Erguna Massif, NE China. Science China Earth Sciences, 60: 1256–1267, doi: 10.1007/s11430-016-9033-5

© 2017 《中国科学》杂志社

带两部分, 然而前人研究多只集中在稳定克拉通地区, 对于造山带及其内部微陆块的地壳增生及再造过程的探索却涉及很少, 因此对于目前已知的中亚造山带内存在的新元古代与显生宙地壳增生值得深入研究(Wu等, 2000, 2003; Jahn等, 2000a, 2000b, 2000c, 2004; Liu等, 2005; Windley等, 2007; Guo等, 2010).

中亚造山带是典型的增生型造山带(Windley等, 1990, 2007; Jahn等, 2000a, 2000b, 2000c; Yakubchuk, 2002, 2004; Xiao等, 2003, 2004), 可作为揭示大陆地壳增生与再造过程的理想场所. 中国东北处于中亚造山带的东段, 该区由一系列微陆块和其间的造山带所组成, 并在地质演化过程中形成了大量多期、多阶段的花岗质岩体, 这些花岗质岩石是记录大量地壳增生和再造信息的重要载体(DePaolo等, 1991; Rudnick, 1995; Wu等, 2011). 近年来, 对该区显生宙花岗岩地球化学的研究表明, 该区地壳增生事件主要发生在显生宙(吴福元等, 1999; Wu等, 2011). 然而, 随着研究程度的提高, 越来越多的证据表明, 显生宙地壳增生事件可能主要发生在该区的古生代造山带中, 而微陆块中深部陆壳的增生与再造过程并非如此(Wang等, 2015; Tang等, 2015). 那么, 微陆块内部陆壳的增生与再造过程如何? 对此目前了解很少. 这些问题的解决不仅对回答这些微陆块的构造归属具有重要制约, 同时对了解造山带内部微陆块的地壳增生与再造过程也具有重要意义. 鉴于此, 本文以额尔古纳地块为例, 通过该区中生代花岗岩的痕量元素和锆石Hf同位素的时空变异研究, 来揭示造山带内微陆块地壳的增生与再造过程, 进而为大陆地壳形成与演化过程和机制提供新的科学依据.

2 地质背景

东北地区由众多微陆块所组成, 这些微陆块自西向东包括额尔古纳地块、兴安地块、松嫩-张广才岭地块、佳木斯地块和兴凯地块(图1a). 在古生代期间, 该区主要经历了古亚洲洋构造体系的演化(李锦轶等, 1999; Wu等, 2002, 2007, 2011; Li, 2006; Xu等, 2009; Meng等, 2010; Wang等, 2012a, 2012b; Cao等, 2013; Li等, 2014), 中生代期间则受到了环太平洋构造体系与蒙古-鄂霍茨克构造体系的叠加影响(葛文春等, 2001; 孟恩等, 2011; Yu等, 2012; Xu等, 2013; 徐美君等, 2013; Sun等, 2013; Dong等, 2014; Tang等, 2014).

额尔古纳地块位于蒙古-鄂霍茨克缝合带的东南侧, 其南东和北西侧分别以喜桂图-塔源断裂和蒙古-鄂霍茨克缝合线为界(图1a). 地块内部出露的地层主要为元古界变质岩系以及古生界和中生界, 其中元古界主要为兴华渡口群(一套由花岗质片麻岩、变质基性、酸性火山岩及少量变质沉积岩组成的火山-沉积建造)、佳疙疸组(为一套颜色较杂的各种片岩、浅粒岩、石英岩及少量变质砂岩等的岩石组合)和额尔古纳河组(为一套大理岩、变粒岩、浅粒岩、云母石英片岩、粉砂质板岩、结晶灰岩、变质长石石英砂岩等的岩石组合)(Zhao等, 2016); 古生界主要为奥陶系多宝山组(一套海相中酸性火山岩夹页岩、板岩的沉积组合)、乌宾敖包组(一套浅海相以各种板岩为主、夹少量粉砂岩及灰岩透镜体的岩石组合)、志留系卧都河组(一套板岩及砂岩板岩互层的岩石组合)和石炭系红水泉组(一套海相正常碎屑岩、灰岩, 局部夹凝灰岩的地层序列)、莫尔根河组(一套海相中酸性火山岩地层序列)及依根河组(一套海陆交互相的碎屑岩组合); 中生界涵盖一系列陆相火山岩和碎屑岩, 主要为侏罗系南平组(一套砾岩、砂岩、薄层泥岩, 局部夹流纹质火山岩的岩石组合)、塔木兰沟组(主要由基性和中基性火山熔岩构成, 含有少量火山碎屑岩)和白垩系吉祥峰组(一套以暗色富钠的流纹岩和火山碎屑岩为主的火山岩地层)、上库力组(一套流纹质、英安质熔岩和火山碎屑岩)、伊列克得组(一套玄武岩、粗安岩、粗面岩组合, 局部可见沉积岩夹层)(内蒙古自治区地质矿产局, 1996; 孟恩等, 2011).

地块内具有复杂的大型断裂构造体系, 其中以得尔布干断裂、额尔古纳河断裂和根河断裂等为主, 此外, 还有众多与之相联系的NW及NE向的引张和扭性断裂(内蒙古自治区地质矿产局, 1996). 区内存在的呈NE走向的大型断裂构造既是重要的导矿构造, 又在一定程度上制约着额尔古纳地块中生代的火山活动以及成矿作用.

对于额尔古纳地块内的岩浆事件, 许多学者曾在本区进行了工作, 获得了众多年代学、地球化学等方面的数据: Tang等(2013)在本区的研究发现, 该区新元古代至少存在四期岩浆事件: (1) 851Ma, 为一套正长花岗岩, 主要出露于上护林、恩和东南部; (2) 792Ma, 该期是一套由辉长岩、辉长闪长岩与正长花岗岩所组

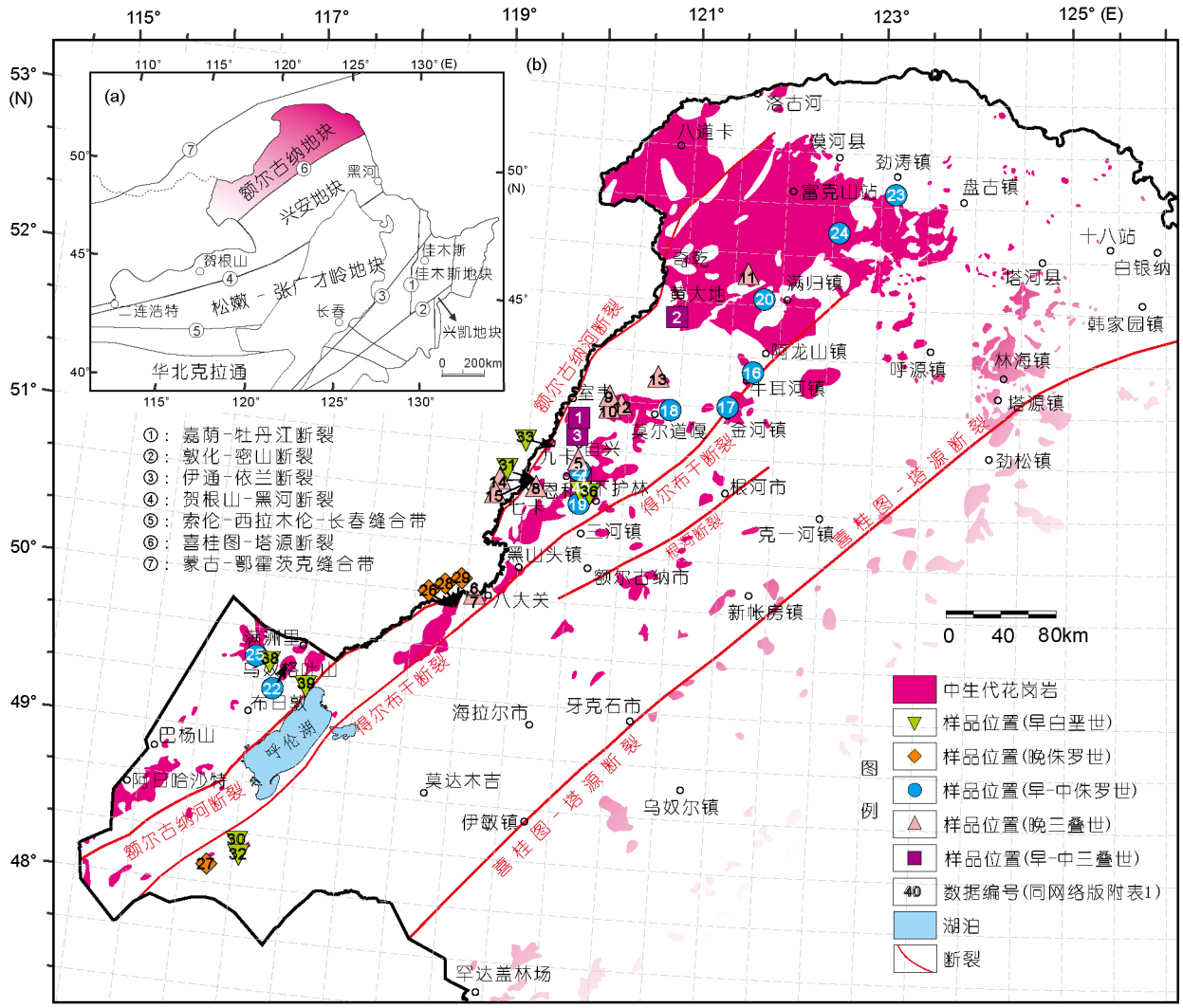


图 1　额尔古纳地块中生代花岗岩分布与样品位置图

(a) 据Wu等(2007)修改

成的双峰式火成岩组合, 出露于室韦东南部; (3) 762Ma, 主要为花岗闪长岩, 出露于室韦东部; (4) 737Ma, 主要为正长花岗岩, 位于恩和东北部. 早古生代的岩浆事件集中于450~500Ma, 代表性岩体主要有阿龙山岩体(456Ma)、关护站岩体(464Ma)、查拉班河岩体(456~481Ma)、满归岩体(480~482Ma)、塔河岩体(494~480Ma)、哈拉巴奇岩体(500~461Ma)、十八站岩体(499Ma)以及西门都里河岩体(502Ma)和洛古河岩体(504~517Ma)等(武广等, 2005; 隋振民等, 2006; 秦秀峰等, 2007; 葛文春等, 2007; Wu等, 2011; Zhao等, 2014); 晚古生代岩浆作用也可分为四期(赵芝, 2011): (1) 晚泥盆世(383~373Ma), 主要为一套钙碱性系列的安山岩-英安岩-流纹岩组合; (2) 早石炭世(355~330Ma), 为一套钙碱性系列辉长岩-石英闪长岩-花岗闪长岩组合(周长勇等, 2005; 赵芝等, 2010); (3) 晚石炭世(320~300Ma), 主要为花岗闪长岩和二长花岗岩, 除少量属于钾玄岩系列的二长-正长花岗岩(隋振民等, 2009), 其余均为高钾钙碱性系列(Wu等, 2011); (4) 早-中二叠世(290~260Ma), 主要为一套碱性花岗岩带(洪大卫等, 1994; 孙德有等, 2000; Wu等, 2002). 该区中生代岩浆事件以花岗岩和流纹岩出露为主, 其形成时代可划分为早-中三叠世(247~241Ma)、晚三叠世(229~202Ma)、早-中侏罗世(197~171Ma)、晚侏罗世(155~150Ma)和早白垩世(145~125Ma)五个阶段(Tang等, 2014, 2015). 这些中生

代花岗岩将是本文研究的重点.

3　额尔古纳地块中生代花岗岩的期次与分布

额尔古纳地块中生代花岗岩主要分布于得尔布干断裂北西侧的满洲里地区(乌奴格吐山、巴杨山)、额尔古纳地区(八大关、上护林盆地、恩和盆地)以及满归、奇乾北部的大部分区域, 其余地区也有零星分布(图1b). 近年来, 随着锆石U-Pb定年技术的成熟与广泛应用, 对出露于额尔古纳地块的中生代花岗岩进行了系统的锆石U-Pb同位素定年工作. 本研究团队关于额尔古纳地块中生代花岗质岩石的研究成果见网络版附表1(http:earthcn.scichina.com, 下同), 其余中生代岩浆活动研究成果汇总见网络版附表2.

根据对额尔古纳地块中生代花岗岩锆石U-Pb定年结果的统计, 可以看出额尔古纳地块中生代花岗质岩浆作用存在245、225、205、195、182、174、153、145和125Ma九个峰期(图2), 根据时代可将它们划分为五个主要阶段:

3.1　早-中三叠世花岗质岩浆活动

结合其他学者的研究, 早-中三叠世花岗质岩浆活动的年龄范围介于249~237Ma(网络版附表1和2), 其峰期年龄为245Ma(图2). 与此峰期年龄一致的花岗质岩浆作用在蒙古-鄂霍茨克缝合带南东侧广泛存在(网络版附表2). 在额尔古纳地块的恩和、室韦、九卡、西牛尔河、莫尔道嘎、八道卡和关护站地区均出露该

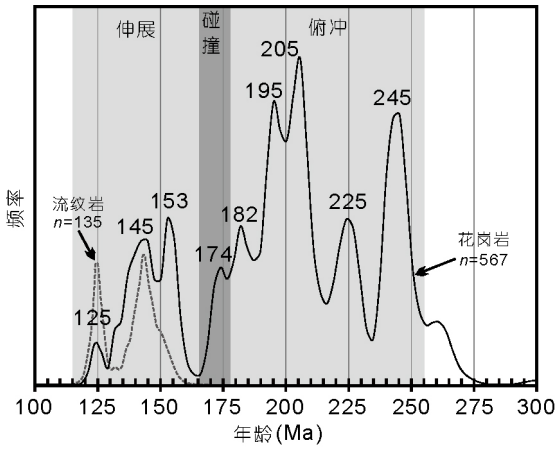


图 2　额尔古纳地块中生代花岗岩锆石U-Pb年龄频谱图

峰期年龄的花岗质岩石(Wu等, 2011; 佘宏全等, 2012; Sun等, 2013; Tang等, 2014, 2016). 此外, 在位于蒙古-鄂霍茨克缝合带南东侧的中蒙古地块上, 该期花岗质岩浆作用同样十分普遍, 例如, 蒙古国中部Hangayn地区的众多花岗岩年龄处于晚二叠世~早-中三叠世(Orolmaa等, 2008)、Tumurtin Ovoo矽卡岩型铅锌矿床中的花岗岩锆石SHRIMP年龄为(241±3)Ma(江思宏等, 2010b), 而Erdenet斑岩型铜钼矿床中的石英闪长岩以及花岗闪长岩的SHRIMP和LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄也位于240~247Ma(江思宏等, 2010a).

3.2　晚三叠世花岗质岩浆活动

晚三叠世花岗质岩浆活动的年龄范围在229~201Ma(网络版附表1和2), 并可进一步划分为两个期次: 225和205Ma(图2). 225Ma这期花岗质岩浆活动在额尔古纳地块分布较少, 除Tang等(2016)在满洲里、八大关地区有所发现外, Wu等(2011)在满归西北部以及额尔古纳东南缘的塔源地区测得正长花岗岩年龄均为(220±3)Ma. 此外, 相似的年龄在蒙古国中部也有所报道, 例如Nariyn Teel岩体和Kharkhorin地块内的花岗质岩石就存在228~230Ma的同位素年龄(Yarmolyuk等, 2002; Jahn等, 2004); 而与205Ma峰期一致的花岗质岩浆事件在满归(Tang等, 2016)、乌奴格吐山(佘宏全等, 2011)、莫尔道嘎(佘宏全等, 2012; Tang等, 2016)、阿龙山(Wu等, 2011)、奇乾地区(Sun等, 2013)以及太平川铜钼矿(陈志广等, 2010)和卡达吉岭铅锌矿(佘宏全等, 2011)等地区广泛存在.

3.3　早-中侏罗世花岗质岩浆活动

早-中侏罗世花岗质岩浆活动时限在199~171Ma(网络版附表1和2), 并存在三个峰期: 195、182和174Ma(图2). 与195Ma年龄一致的花岗质岩浆事件在金河(Wu等, 2011; Tang等, 2016)、满归西部(Sun等, 2013)、西林吉(Wu等, 2011)、莫尔道嘎(Wu等, 2011; Tang等, 2016)以及富克山(Wu等, 2011)等地有过报道. 同位素年龄与182Ma较为一致的花岗质岩浆事件在绿林(Wu等, 2011)、盘古(Wu等, 2011)、乌奴格吐山(王伟等, 2012; 佘宏全等, 2012; 王天豪等, 2014)、漠河(Sun等, 2013)、满归(Wu等, 2011)以及富克山(Sun等, 2013)等地出现; 而与174Ma峰期年龄较一致的花岗质岩浆事件位于满归、阿木尔镇、查干陶勒盖山(王伟等,

2012)、乌奴格吐山(余宏全等, 2012)和达石莫(王天豪等, 2014)等地.

3.4 晚侏罗世花岗质岩浆活动

该期花岗质岩浆事件年龄介于155~149Ma(网络版附表1和2), 峰期年龄153Ma(图2). 其主要存在于八大关(Tang等, 2015)、室韦(Tang等, 2016)、满归(Sun等, 2013; Tang等, 2015, 2016)、包格德乌拉(王伟等, 2012; 王天豪等, 2014)和阿日哈沙特地区(王天豪等, 2014).

3.5 早白垩世花岗质岩浆活动

该期花岗质岩浆事件年龄介于145~125Ma(网络版附表1和2), 又可划分出两个期次: 145和125Ma(图2), 但以145Ma为主, 分布在七卡(Tang等, 2015)、乌奴格吐山(余宏全等, 2012)、包格德乌拉(王伟等, 2012; 王天豪等, 2014)以及阿日哈沙特(王天豪等, 2014)等地; 125Ma的年龄则仅见于牛耳河碱长花岗岩(Wu等, 2011)和九卡二长花岗岩岩脉中(Tang等, 2015). 不同于中生代其他阶段的花岗质岩浆事件, 额尔古纳地块早白垩世岩浆活动以流纹岩的大规模喷发为主, 并主要分布在地块南部的满洲里地区, 通过统计本团队以往的流纹岩研究数据(网络版附表1), 这些白垩纪流纹岩基本上划分为两期(图2虚线): 早白垩世早期(峰期年龄约143Ma, 与吉祥峰组相对应)和早白垩世晚期(峰期年龄约125Ma, 与上库力组相对应).

4 额尔古纳地块中生代花岗岩地球化学特征与成因

本文选取的额尔古纳地块中生代花岗质岩石主要为一套花岗闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩组合(网络版附表1), 在TAS图解中, 它们均投影在花岗闪长岩和花岗岩范围内, 同时落入亚碱性系列(图3). 本文也对这些花岗岩的锆石饱和温度进行了计算, 计算方法来自Watson和Harrison(1983, 2005)从高温实验(700~1300℃)得出的锆石溶解度模拟公式. 原理是基于花岗岩熔体中锆石出现结晶时Zr在固体/熔体两相间的分配系数是温度的函数, 故假设其活度系数为1, 由Zr的溶解度公式可以推导出锆石饱和温度:

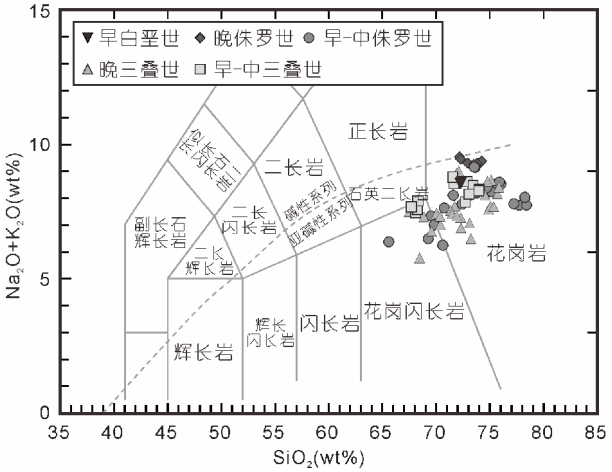


图 3 额尔古纳地块中生代花岗岩硅-碱图

引自Maitre(1989)

$$T_{Zr}(^{\circ}\mathrm{C}) = \{12900 / [\ln D_{Zr}(496000 / \mathrm{Melt}) + 0.85 \times M + 2.95]\} - 273.15, \quad (1)$$

式中, D_{Zr}为Zr的分配系数, M=(2Ca+K+Na)/(Si×Al), 计算公式中Ca、K、Na、Si、Al为经过锆石寄主岩石主量元素Si、Al、Fe、Mg、Ca、Na、K、P原子数归一化计算后的原子分数值. 不做Zr、Hf校正时纯锆石中Zr的含量为496000×10^{-6}ppm, 一般用全岩中的Zr含量近似代表熔体中Zr的含量.

从结果来看(图4), 这些中生代花岗岩的锆石饱和温度明显出现两个系列: 早-中三叠世~早-中侏罗世花岗岩(< 825℃)和晚侏罗世~早白垩世花岗岩(> 825℃), 这与Tang等(2014, 2015, 2016)确定的早-中三叠世~早-中侏罗世花岗岩主体属于I型花岗岩, 而晚侏罗世~早白垩世花岗岩均为A型花岗岩的结果相一致.

此外, 这些中生代不同期次花岗岩的主量元素变化不明显(图5), 但它们的微量元素表现为随时代变新, Sr/Y比值、Eu/Eu*值以及Sr含量不断降低, 而Zr及Y含量逐渐升高的特征(图6). 由于本文选取的花岗岩SiO_2含量变化范围较大, 因此对于一些参数, 如Sr/Y、$(La/Yb)_N$比值等的变化是否是岩浆分异演化的结果? 本文认为, 花岗质岩浆的黏度大, 在很大程度上表现为晶粥体(Pitcher, 1997), 因此其发生分离结晶作用的能力并不强(张旗等, 2007), 并且由于单个侵入体从岩浆形成到锆石U-Pb同位素体系封闭的时间不超过1Ma(Petford等, 2000; Glazner等, 2004). 因此, 基于上述考虑, 认为本文研究的中生代花岗岩基本上反映了

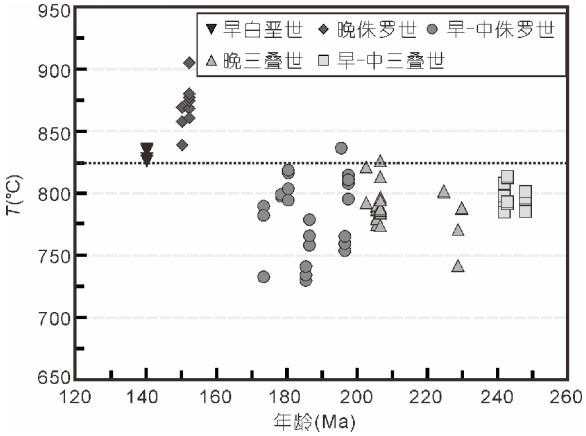


图 4　锆石饱和温度随时代变化图

原始岩浆特征, 同一时代、不同空间分布的花岗岩, 其地球化学属性的差异反映了源区成分横向上的变化, 而同一空间、不同时代花岗岩成分上的差则也应是岩浆源区性质不同(纵向)的反映.

众多研究显示Sr/Y比值的变化与地壳厚度之间是存在相关性的(Girardi等, 2012; Chapman等, 2015; Chiaradia, 2015; Paterson和Ducea, 2015), 故本文认为额尔古纳地块中生代花岗岩Sr/Y比值不断下降的趋势(图6a)应是对于地壳厚度不断减薄的微观反映. 上述认识也得到了该区中生代地质演化历史的印证, 如: 中生代早期(包括三叠纪和早侏罗世)该区经历了蒙古-鄂霍茨克大洋板块的南向俯冲作用, 处于活动陆缘的构造背景, 这与该区早中生代陆壳加厚过程的存在相吻合(早中生代存在活动陆缘环境下形成的埃达克质岩石)(陈志广等, 2010; Tang等, 2016). 到中侏罗世, 大兴安岭北段具"S"型花岗岩地球化学属性的白云母花岗岩的发现证明了蒙古-鄂霍茨克洋的闭合和陆-陆碰撞的发生(李宇等, 2015), 这些均说明该阶段确实存在陆壳加厚过程. 而晚侏罗世~早白垩世A型花岗岩和碱性流纹岩的出现, 揭示了额尔古纳地块造山后伸展环境的存在和地壳减薄作用的发生. 然而, 与Sr/Y比值变化相比, 这些花岗岩的$(La/Yb)_N$比值随着年龄的变化并不明显(图6c), 这是否意味着各时期石榴子石作为残留相的变化不大, 未必是地壳厚度的差异引起的? 首先, 结合已有的研究, 高$(La/Yb)_N$比值的形成可以与加厚/拆沉下地壳熔融(Atherton和Petford, 1993)、分离结晶(Richards和Kerrich, 2007)、岩浆混合(Guo等,

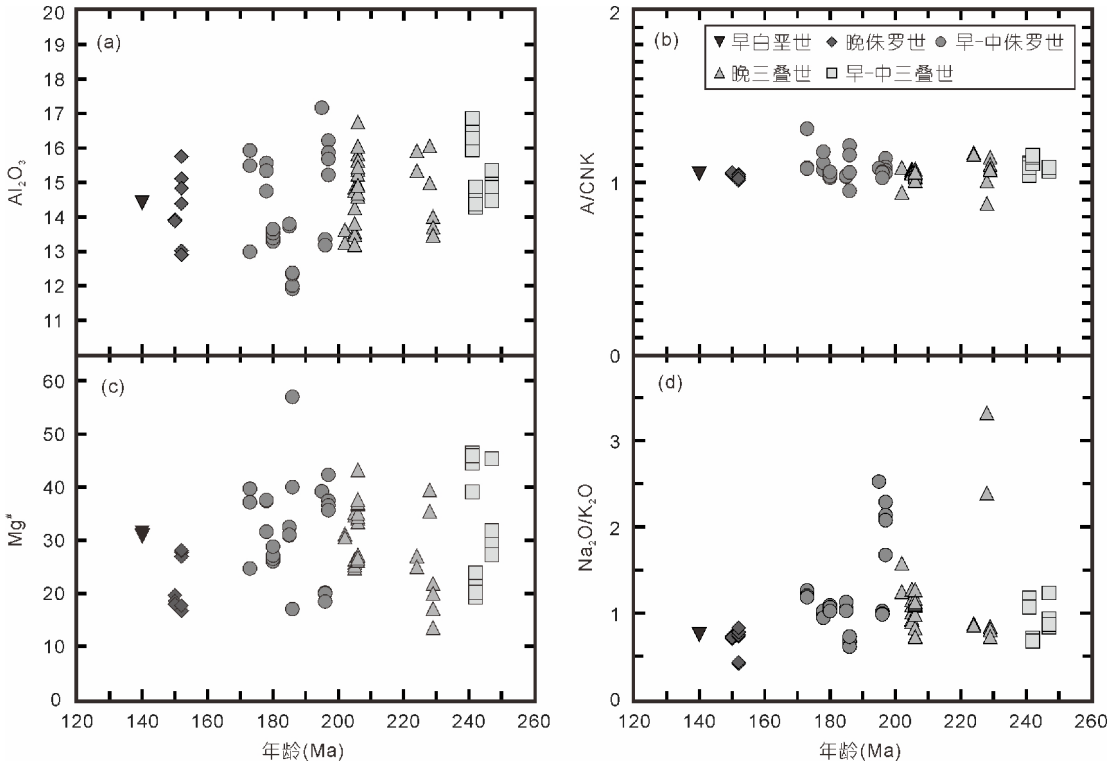


图 5　额尔古纳地块中生代各期次花岗岩部分主量元素随时代变化图

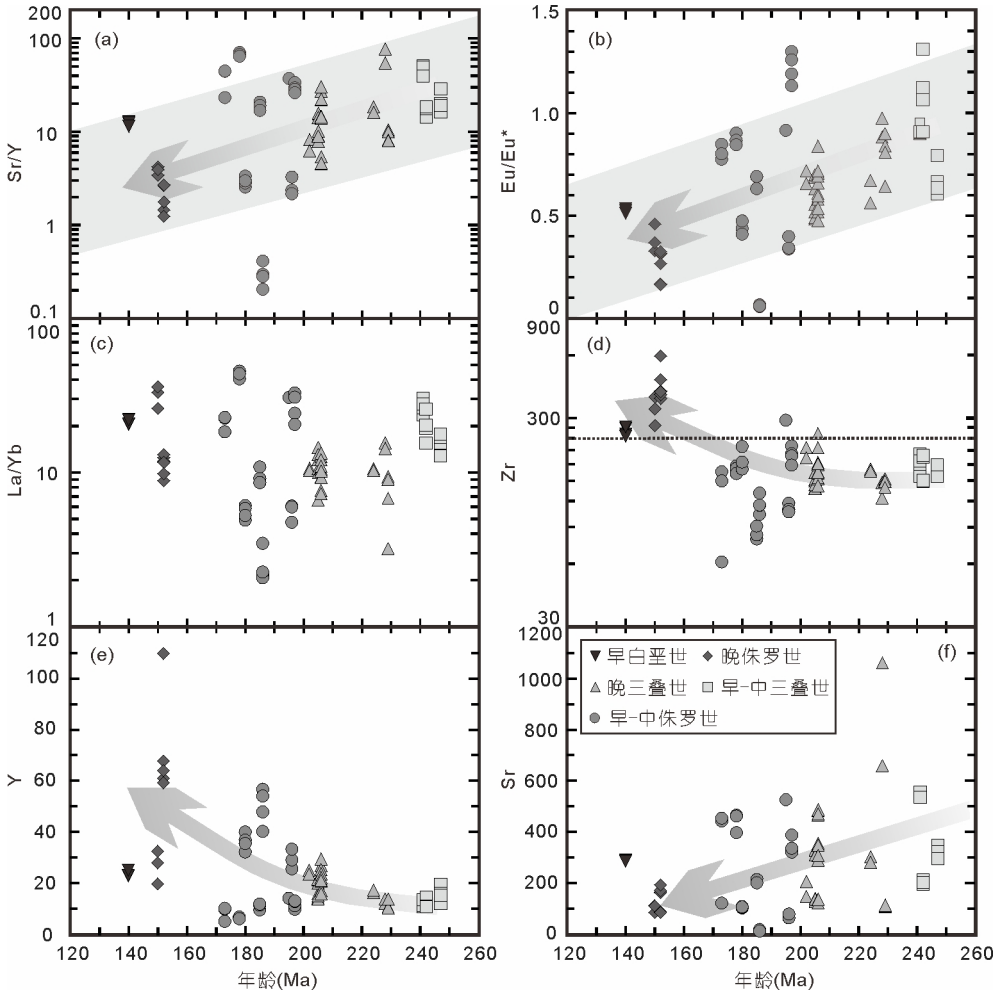


图 6　额尔古纳地块中生代各期次花岗岩部分微量元素随时代变化图

2007)、麻粒岩熔融(Jiang等, 2007)、富集地幔熔融(Martin等, 2005)等过程有关, 这说明$(La/Yb)_N$比值可能受多种因素控制, 并不仅仅是陆壳厚度的函数(赵振华, 2016); 其次, 研究发现本区中生代花岗岩中Y含量随时代变新具有升高的趋势(图6e), 这反应岩浆源区石榴石残留量的减小, 同样暗示了地壳厚度的减薄过程. 因此, Sr/Y比值和Y含量随花岗岩时代的变化, 基本上真实反映了陆壳厚度的变化, 这与区域地质演化历史是吻合的(图2). 此外, 由于斜长石富集Eu和Sr, 研究区中生代花岗岩Eu/Eu^*值以及Sr含量的不断降低(图6b和f)应与岩浆源区斜长石残留量逐渐增多存在关联(Girardi等, 2012).

由于这些中生代花岗岩SiO_2含量大于65%, 且具有高Al_2O_3, 低$Mg^{\#}$、TFe_2O_3和低Cr、Co、Ni含量等特征, 暗示其并未发生与幔源基性岩浆的混合, 应为典型的地壳来源(卢良兆和许文良, 2011), 结合它们所表现的轻稀土元素(LREE)与大离子亲石元素(LILE)富集、重稀土元素(HREE)与高场强元素(HFSE)亏损, 具有较大的$(La/Yb)_N$值(平均23.0)的特征, 可以判定这些中生代花岗岩的原始岩浆应起源于下地壳物质的部分熔融(Xu等, 2009; Tang等, 2014, 2015, 2016), 它们的地球化学属性基本上反映了岩浆源区的性质.

5　额尔古纳地块中生代花岗岩中锆石Hf同位素组成

本文对本研究团队近年来取得的中生代花岗岩锆石Hf同位素数据进行了总结, 数据来源见网络版附表1, 并且对以往空缺的中侏罗世之后的花岗岩锆石

Hf同位素结果进行了补充, 见网络版附表3. 由于捕获锆石数据差异较大, 存在不确定性, 故本文仅对结晶年龄锆石的Hf同位素组成进行讨论.

5.1　Hf同位素分析方法

在LA-ICP-MS锆石U-Pb定年的基础上, 参照锆石阴极发光(CL)图像对本文中侏罗世之后的花岗岩样品进行了锆石微区Hf同位素测定工作. 锆石原位Lu-Hf同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所配有Geolas 193nm激光取样系统的Neptune多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-LA-ICPMS)上进行, 所用的激光束斑直径为44μm, 激光脉冲宽度为15ns, 激光脉冲速率为6~8Hz, 激光光束脉冲能量为100mJ. 实验中采用He气作为剥蚀物质载气, 测定时用国际标样91500作外标. 详细的测试过程见徐平等(2004), 详细测试流程以及仪器运行条件等参见Wu等(2006). 本文测定的早-中侏罗世~早白垩世花岗岩样品的Lu-Hf同位素数据见网络版附表3. 需要说明的是, 本文在进行锆石Lu-Hf同位素分析结果处理时, 均采用大陆平均地壳(−0.5482)作为标准化数据.

5.2　额尔古纳地块中生代花岗岩锆石Hf同位素组成

额尔古纳地块中生代不同地区、不同期次花岗岩中锆石的Hf同位素数据在图7a中落入CAOB范围内, 显示它们与典型的兴蒙造山带显生宙火成岩的锆石Hf同位素组成相一致, 而显著区别于燕山褶皱带(YFTB)的显生宙锆石Hf同位素组成(Xiao等, 2004; Yang等, 2006).

(1) 早-中三叠世花岗岩中锆石Hf同位素组成. 早-中三叠世花岗岩锆石U-Pb年龄主要为~241、~242、~246和~247Ma. 其中247Ma的花岗岩锆石Hf同位素数据中存在两个分散点, 可能是由于其锆石中含有包体或存在岩浆混合作用导致的, 故将其舍去. 32个分析点所给出的$^{176}Hf/^{177}Hf$值在0.282570~0.282817, 其$\varepsilon_{Hf}(t)$值介于−2.0~6.6(图7b). 二阶段Hf模式年龄(T_{DM2})介于849~1395Ma之间(图7c), 平均值为1231Ma.

(2) 晚三叠世花岗岩中锆石Hf同位素组成. 晚三叠世花岗岩锆石U-Pb年龄主要为~202、~203、~205、~206、~224、~228和~229Ma. 86个分析点给出的$^{176}Hf/^{177}Hf$值在0.282597~0.282821, $\varepsilon_{Hf}(t)$值介于−1.8~6.6(图7b). 二阶段Hf模式年龄(T_{DM2})介于838~1357Ma(图7c), 平均值为1124Ma.

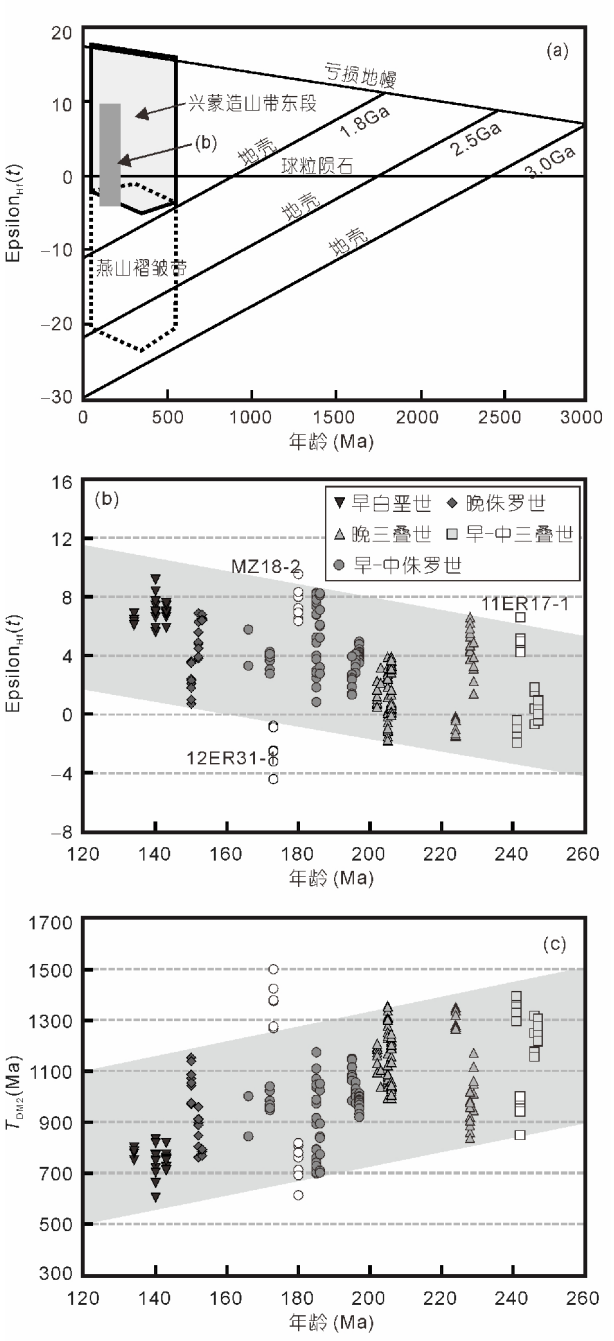


图 7　额尔古纳地块中生代花岗岩锆石Hf同位素组成随时代变化图

(a) 锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$值随时代变化图(引自Yang等, 2006); (b) 锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$值随时代变化详图; (c)锆石T_{DM2}(Ma)值随时代变化详图

(3) 早-中侏罗世花岗岩中锆石Hf同位素组成.

早侏罗世花岗岩锆石U-Pb年龄主要为~171、~173、~180、~185、~186、~195、~196和~197Ma. 在这其中, 180、185、186和196Ma的花岗岩体锆石Hf同位素数据存在七个分散点, 可能是由于其锆石中含有包体或存在岩浆混合作用导致的, 故将其舍去. 73个分析点给出的$^{176}Hf/^{177}Hf$值在0.282541~0.282940, 其$\varepsilon_{Hf}(t)$值介于−4.4~9.6(图7b). 二阶段Hf模式年龄(T_{DM2})介于613~1501Ma(图7c), 平均值为971Ma.

(4) 晚侏罗世花岗岩中锆石Hf同位素组成. 晚侏罗世花岗岩锆石U-Pb年龄主要为~150、~152和~153Ma. 其中153Ma的花岗岩锆石Hf同位素数据存在两个分散点, 可能是其锆石中含有包体或存在岩浆混合作用导致的, 故将其舍去. 共24个分析点给出的$^{176}Hf/^{177}Hf$值在0.282701~0.282877, 其$\varepsilon_{Hf}(t)$值介于0.7~6.9(图7b). 二阶段Hf模式年龄(T_{DM2})介于761~1154Ma(图7c), 平均值为919Ma.

(5) 早白垩世花岗岩锆石Hf同位素组成. 早白垩世花岗岩锆石U-Pb年龄主要为~134、~140和~145Ma. 24个分析点给出的$^{176}Hf/^{177}Hf$值在0.282847~0.282952, 其$\varepsilon_{Hf}(t)$值介于5.6~9.2(图7b). 二阶段Hf模式年龄(T_{DM2})介于604~834Ma(图7c), 平均值为750Ma.

6 锆石Hf同位素组成时空变异与陆壳增生及再造过程

6.1 中生代花岗岩锆石Hf同位素组成随时代变异

根据所有中生代花岗岩锆石Hf同位素数据变化情况, 可明显观察到额尔古纳地块中生代花岗岩中锆石Hf同位素组成总体上随时代变新(早-中三叠世~晚三叠世~早-中侏罗世~晚侏罗世~早白垩世), 其$\varepsilon_{Hf}(t)$值逐渐升高(图7b), 而二阶段模式年龄T_{DM2}(Ma)则逐渐降低(中元古代~新元古代)(图7c). 锆石Hf同位素随时代的连续变化, 揭示额尔古纳地块不同期次花岗质岩浆的产生经历了从古老陆壳物质的部分熔融到新增生陆壳物质部分熔融的变化过程. 但是还有部分花岗岩锆石Hf同位素数据(图7b和c白色数据图标)明显表现出与总体变化之间的不谐和性, 这种不谐和应与岩浆源区的空间变异存在关联(图8).

6.2 中生代花岗岩锆石Hf同位素组成的空间变异

按照中生代花岗岩产出的空间位置对其$\varepsilon_{Hf}(t)$值进行分析(图8), 发现它们的锆石Hf同位素$\varepsilon_{Hf}(t)$值随纬度升高具有一致下降的趋势, 表明自南向北额尔古纳地块深部陆壳中古老陆壳组份逐渐增加, 这也与额尔古纳地块北东部广泛出现新元古代地质体和少量古元古代地质体的地质事实相吻合(佘宏全等, 2012; Tang等, 2013; 孙立新等, 2013; 邵军等, 2015; 赵硕等, 2016a, 2016b). 另外, 在同一纬度范围内, 花岗岩中锆石的$\varepsilon_{Hf}(t)$值同样存在较大差异(图8灰色花纹部分). 据此, 本文认为额尔古纳地块深部陆壳存在着横向和垂向上的不均一性.

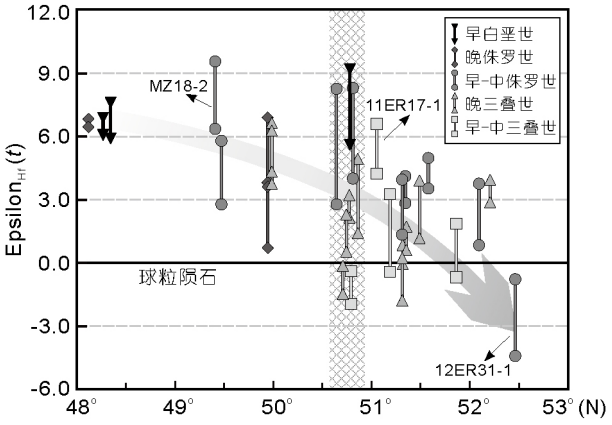


图 8　中生代花岗岩锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$值与纬度关系图

6.3 陆壳增生及再造过程

额尔古纳地块存在古老陆壳已被近年的研究所证实, 如孙立新等(2013)在额尔古纳地块北部韩家园镇一带发现了古元古代花岗片麻岩, 锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄为(1837±5)、(1741±30)和(1854±20)Ma, 其中部分样品锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$值为−3.9~−8.5, 地壳模式年龄(T_{DM2})为2.78~3.01Ga; 邵军等(2015)也在额尔古纳地块比列亚铅锌多金属矿区采得的片麻状二长花岗岩中获得了(2606±17)Ma的锆石结晶年龄; 本研究团队赵硕等(2016a)在满归地区采得的新元古代花岗岩也测得了>2000Ma的二阶段模式年龄(T_{DM2}). 这些数据均表明该区应存在有古元古代乃至太古代的古老基底, 可能反映了额尔古纳地块陆壳的形成时间, 后期由于中亚造山带经历了复杂的构造演化, 先存地壳被逐步改造, 使得目前仅余有极小规模的出露.

本文通过对额尔古纳地块中生代花岗岩中锆石Hf同位素二阶段模式年龄(T_{DM2})(Ma)的统计(图9), 可

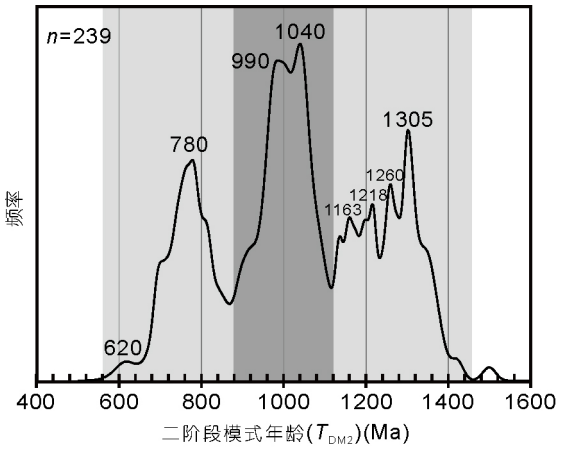


图 9　额尔古纳地块中生代花岗岩中锆石Hf同位素二阶段模式年龄T_{DM2}(Ma)频谱图

以判定, 额尔古纳地块深部陆壳的生长主要发生在三个阶段: (1) 中元古代; (2) 中元古代末期~新元古代早期; (3) 新元古代. 暗示中亚造山带东段陆壳主体是在中元古代~新元古代增生的, 不同于前人认定的中亚造山带中众多微陆块内部地壳增生主要发生在显生宙的观点(吴福元等, 1999; Wu等, 2011).

中生代花岗岩中锆石的Hf同位素组成揭示了微陆块之下深部陆壳的增生过程主要发生在中-新元古代. 那么, 额尔古纳地块中生代不同期次花岗岩的形成是否来自相同的源岩类型? 这就是本文所要探讨的深部陆壳的再造过程. 从中生代花岗岩锆石的T_{DM2}与岩体形成时代变异图(图7c), 结合锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$值随纬度的变化(图8), 可以看出, 在额尔古纳地块北东部, 早-中三叠世花岗岩的原始岩浆主要由中元古代源岩再造所成, 而随着花岗岩形成时代变新, 形成花岗质岩浆的源岩时代也相应变新(从中元古代到新元古代). 相反, 在南西侧, 晚侏罗世和早白垩世花岗岩主要由新元古代源岩再造所成, 而位于中部的晚侏罗世花岗岩则主要由中元古代晚期源岩再造而成. 综上所述, 额尔古纳地块中生代花岗岩是由深部陆壳中不同部位、不同时代源岩再造形成的.

根据额尔古纳地块深部陆壳存在垂向和侧向的不均一性, 并结合其增生与再造过程, 本文提出了额尔古纳地块下部陆壳的结构模型(图10): 幔源岩浆底侵作用是额尔古纳地块最主要的陆壳增生方式, 并表现为垂向上新增生地壳与下部古老地壳的不完全连续——即在同一地区, 深部陆壳自下而上源岩年龄具

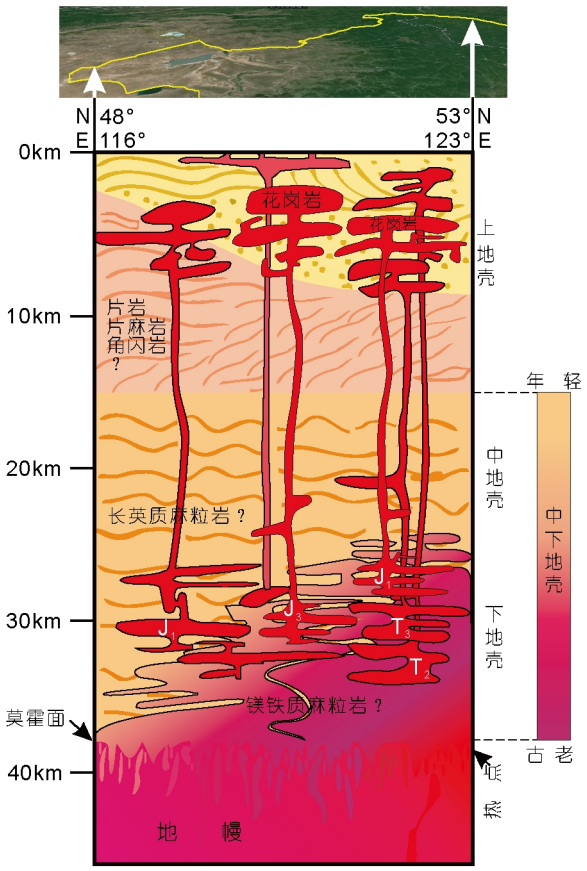


图 10　额尔古纳地块下部陆壳结构模型

据Hawkesworth和Kemp(2006)、Cawood等(2013)和Roberts等(2015)修改

有变新的趋势, 而在横向上, 自48°N向53°N, 深部陆壳中古老地壳成分逐渐增多. 中生代期间, 额尔古纳地块深部陆壳不同深度、不同性质源岩部分熔融形成的花岗质岩浆向上运移, 并侵位于地壳上部, 最终形成了额尔古纳地块大面积分布的中生代花岗岩.

7　结论

(1) 额尔古纳地块中生代花岗质岩浆作用存在245、225、205、195、182、174、153、145和125Ma九个峰期, 这些峰期可划归为五个主要阶段: 早-中三叠世、晚三叠世、早-中侏罗世、晚侏罗世和早白垩世.

(2) 额尔古纳地块中生代花岗岩随时代变新, Sr/Y、Eu/Eu*比值以及Sr含量降低, 而Zr及Y含量表现为升高的特征. 这反映额尔古纳地块经历了由陆壳

加厚到不断减薄的过程. 在此过程中, 岩浆源区斜长石的残留量逐渐增多.

(3) 额尔古纳地块中生代花岗岩锆石Hf同位素组成揭示该区深部陆壳增生以中元古代~新元古代增生为主.

(4) 额尔古纳地块中生代花岗岩形成揭示了深部陆壳的再造过程: 即在蒙古-鄂霍茨克洋壳俯冲-碰撞-伸展构造背景控制下, 不同期次花岗质岩浆的产生经历了从古老陆壳的熔融向新增生陆壳物质熔融的变化过程.

致谢 感谢审稿人提出的意见与建议, 这对于提高本文的质量大有裨益. 同时感谢中国科学院地质与地球物理研究所和中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室在锆石LA-ICP-MS U-Pb分析以及主量元素、微量元素和Hf同位素测试过程中给予的大力帮助.

参考文献

陈志广, 张连昌, 卢百志, 李占龙, 吴华英, 相鹏, 黄世武. 2010. 内蒙古太平川铜钼矿成矿斑岩时代、地球化学及地质意义. 岩石学报, 26: 1437–1449

葛文春, 李献华, 林强, 孙德有, 吴福元, 尹成孝. 2001. 呼伦湖早白垩世碱性流纹岩的地球化学特征及其意义. 地质科学, 36: 176–183

葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 2007. 兴蒙造山带东段斑岩型Cu-Mo矿床成矿时代及其地球动力学意义. 科学通报, 52: 2407–2417

洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君, 徐海明, 靳满元. 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: 219–230

江思宏, 聂凤军, 苏永江, 白大明, 刘翼飞. 2010a. 蒙古国额尔登特特大型铜-钼矿床年代学与成因研究. 地球学报, 31: 289–306

江思宏, 聂凤军, 苏永江, 蔡建新, 丁钟. 2010b. 蒙古国图木尔廷敖包大型锌矿床地质特征及成因. 地球学报, 31: 321–330

李锦轶, 牛宝贵, 宋彪. 1999. 长白山北段地壳的形成与演化. 北京: 地质出版社. 137

李宇, 丁磊磊, 许文良, 王枫, 唐杰, 赵硕, 王子进. 2015. 孙吴地区中侏罗世白云母花岗岩的年代学与地球化学: 对蒙古-鄂霍茨克洋闭合时间的限定. 岩石学报, 31: 56–66

卢良兆, 许文良. 2011. 岩石学. 北京: 地质出版社. 377

孟恩, 许文良, 杨德彬, 邱昆峰, 李长华, 祝洪涛. 2011. 满洲里地区灵泉盆地中生代火山岩的锆石U-Pb年代学, 地球化学及其地质意义. 岩石学报, 27: 1209–1226

内蒙古自治区地质矿产局. 1996. 内蒙古自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社. 342

秦秀峰, 尹志刚, 汪岩, 郭原生, 刘旭光, 周世强. 2007. 大兴安岭北端漠河地区早古生代埃达克质岩特征及地质意义. 岩石学报, 23: 1501–1511

邵军, 李永飞, 周永恒, 王宏博, 张璟. 2015. 中国东北额尔古纳地块新太古代岩浆事件——钻孔片麻状二长花岗岩锆石LA-ICP-MS测年证据. 吉林大学学报(地球科学版), 45: 364–373

佘宏全, 李进文, 向安平, 关继东, 杨郧城, 张德全, 谭刚, 张斌. 2012. 大兴安岭中北段原岩锆石U-Pb测年及其与区域构造演化关系. 岩石学报, 28: 571–594

佘宏全, 梁玉伟, 李进文, 关继东, 张德全, 杨郧城, 向安平, 金俊, 谭刚, 张斌. 2011. 内蒙古莫尔道嘎地区早中生代岩浆作用及其地球动力学意义. 吉林大学学报(地球科学版), 41: 1831–1864

隋振民, 葛文春, 吴福元, 徐学纯, 王清海. 2006. 大兴安岭东北部哈拉巴奇花岗岩体锆石U-Pb年龄及其成因. 世界地质, 25: 229–236

隋振民, 葛文春, 徐学纯, 张吉衡. 2009. 大兴安岭十二站晚古生代后造山花岗岩的特征及其地质意义. 岩石学报, 25: 2679–2686

孙德有, 吴福元, 李惠民, 林强. 2000. 小兴安岭西北部造山后A型花岗岩的时代及与索伦山-贺根山-扎赉特碰撞拼合带东延的关系. 科学通报, 45: 2217–2222

孙立新, 任邦方, 赵凤清, 冀世平, 耿建珍. 2013. 内蒙古额尔古纳地块古元古代末期的岩浆记录——来自花岗片麻岩的锆石U-Pb年龄证据. 地质通报, 32: 341–352

王天豪, 张书义, 孙德有, 苟军, 任云生, 武鹏飞, 柳小明. 2014. 满洲里南部中生代花岗岩的锆石U-Pb年龄及Hf同位素特征. 世界地质, 33: 26–38

王伟, 许文良, 王枫, 孟恩. 2012. 满洲里-额尔古纳地区中生代花岗岩的锆石U-Pb年代学与岩石组合: 对区域构造演化的制约. 高校地质学报, 18: 88–105

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

武广, 孙丰月, 赵财胜, 李之彤, 赵爱琳, 庞庆帮, 李广远. 2005. 额尔古纳地块北缘早古生代后碰撞花岗岩的发现及其地质意义. 科学通报, 50: 2278–2288

徐美君, 许文良, 王枫, 高福红, 于介江. 2013. 小兴安岭中部早侏罗世花岗质岩石的年代学与地球化学及其构造意义. 岩石学报, 29: 354–368

徐平, 吴福元, 谢烈文, 杨岳衡. 2004. U-Pb同位素定年标准锆石的Hf同位素. 科学通报, 49: 1403–1410

张旗, 潘国强, 李承东, 金惟俊, 贾秀勤. 2007. 花岗岩结晶分离作用问题——关于花岗岩研究的思考之二. 岩石学报, 23: 1239–1251

赵硕, 许文良, 唐杰, 李宇, 郭鹏. 2016a. 额尔古纳地块新元古代岩浆作用与微陆块构造属性: 来自侵入岩锆石U-Pb年代学、地球化学和Hf同位素的制约. 地球科学, 41: 1803–1829

赵硕, 许文良, 王枫, 王伟, 唐杰, 张一涵. 2016b. 额尔古纳地块新元古代岩浆作用: 锆石U-Pb年代学证据. 大地构造与成矿学, 40: 559–573

赵振华. 2016. 微量元素地球化学原理. 第2版. 北京: 科学出版社. 534

赵芝, 迟效国, 潘世语, 刘建峰, 孙巍, 胡兆初. 2010. 小兴安岭西北部石炭纪地层火山岩的锆石LA-ICP-MS U-Pb年代学及其地质意义. 岩石学报, 26: 2452–2464

赵芝. 2011. 大兴安岭北部晚古生代岩浆作用及其构造意义. 博士学位论文. 长春: 吉林大学

周长勇, 吴福元, 葛文春, 孙德有, Abdel R A A, 张吉衡, 程瑞玉. 2005. 大兴安岭北部塔河堆晶辉长岩体的形成时代、地球化学特征及其成因. 岩石学报, 21: 763–775

Atherton M P, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. Nature, 362: 144–146

Belousova E A, Kostitsyn Y A, Griffin W L, Begg G C, O'Reilly S Y, Pearson N J. 2010. The growth of the continental crust: Constraints from zircon Hf-isotope data. Lithos, 119: 457–466

Campbell I H, Taylor S R. 1983. No water, no granites—No oceans, no continents. Geophys Res Lett, 10: 1061–1064

Cao H H, Xu W L, Pei F P, Wang Z W, Wang F, Wang Z J. 2013. Zircon U-Pb geochronology and petrogenesis of the Late Paleozoic-Early Mesozoic intrusive rocks in the eastern segment of the northern margin of the North China Block. Lithos, 170-171: 191–207

Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. 2013. The continental record and the generation of continental crust. Geol Soc Am Bull, 125: 14–32

Chapman J B, Ducea M N, DeCelles P G, Profeta L. 2015. Tracking changes in crustal thickness during orogenic evolution with Sr/Y: An example from the North American Cordillera. Geology, 43: 919–922

Chiaradia M. 2015. Crustal thickness control on Sr/Y signatures of recent arc magmas: An Earth scale perspective. Sci Rep, 5: 8115

DePaolo D J, Linn A M, Schubert G. 1991. The continental crustal age distribution: Methods of determining mantle separation ages from Sm-Nd isotopic data and application to the southwestern United States. J Geophys Res, 96: 2071–2088

Dhuime B, Hawkesworth C, Cawood P. 2011. When continents formed. Science, 331: 154–155

Dhuime B, Hawkesworth C J, Cawood P A, Storey C D. 2012. A change in the geodynamics of continental growth 3 billion years ago. Science, 335: 1334–1336

Dong Y, Ge W C, Yang H, Zhao G C, Wang Q H, Zhang Y L, Su L. 2014. Geochronology and geochemistry of Early Cretaceous volcanic rocks from the Baiyingaolao Formation in the central Great Xing'an Range, NE China, and its tectonic implications. Lithos, 205: 168–184

Girardi J D, Patchett P J, Ducea M N, Gehrels G E, Cecil M R, Rusmore M E, Woodsworth G J, Pearson D M, Manthei C, Wetmore P. 2012. Elemental and isotopic evidence for granitoid genesis from deep-seated sources in the coast mountains batholith, British Columbia. J Petrol, 53: 1505–1536

Glazner A F, Bartley J M, Coleman D S, Gray W, Taylor R Z. 2004. Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers? Gsa Today, 14: 4–11

Guo F, Fan W M, Gao X F, Li C W, Miao L C, Zhao L, Li H X. 2010. Sr-Nd-Pb isotope mapping of Mesozoic igneous rocks in NE China: Constraints on tectonic framework and Phanerozoic crustal growth. Lithos, 120: 563–578

Guo F, Nakamuru E, Fan W, Kobayoshi K, Li C. 2007. Generation of palaeocene adakitic andesites by magma mixing: Yanji Area, NE China. J Petrol, 48: 41–55

Hawkesworth C J, Kemp A I S. 2006. The differentiation and rates of generation of the continental crust. Chem Geol, 226: 134–143

Jacobsen S B. 1988. Isotopic and chemical constraints on mantle-crust evolution. Geochim Cosmochim Acta, 52: 1341–1350

Jahn B M, Capdevila R, Liu D Y, Vernon A, Badarch G. 2004. Sources of Phanerozoic granitoids in the transect Bayanhongor-Ulaan Baatar, Mongolia: Geochemical and Nd isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. J Asian Earth Sci, 23: 629–653

Jahn B M, Wu F Y, Chen B. 2000a. Massive granitoid generation in central Asia: Nd isotopic evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. Episodes, 23: 82–92

Jahn B M, Wu F Y, Chen B. 2000b. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. Trans R Soc Edinb-Earth Sci, 91: 181–193

Jahn B M, Wu F Y, Hong D. 2000c. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia. J Earth Syst Sci, 109: 5–20

Jiang N, Liu Y, Zhou W, Yang J, Zhang S. 2007. Derivation of Mesozoic adakitic magmas from ancient lower crust in the North China craton. Geochim Cosmochim Acta, 71: 2591–2608

Li J Y. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. J Asian Earth Sci, 26: 207–224

Li Y, Xu W L, Wang F, Tang J, Pei F P, Wang Z J. 2014. Geochronology and geochemistry of late Paleozoic volcanic rocks on the western margin of the Songnen-Zhangguangcai Range massif, NE China: Implications for the amalgamation history of the Xing'an and Songnen-Zhangguangcai Range massifs. Lithos, 205: 394–410

Liu W, Siebel W, Li X J, Pan X F. 2005. Petrogenesis of the Linxi granitoids, northern Inner Mongolia of China: Constraints on basaltic underplating. Chem Geol, 219: 5–35

Maitre R W L. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford: Blackwell Scientific Publications. 193

Martin H, Smithies R H, Rapp R, Moyen J F, Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and

sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. Lithos, 79: 1–24

Meng E, Xu W L, Pei F P, Yang D B, Yu Y, Zhang X Z. 2010. Detrital-zircon geochronology of Late Paleozoic sedimentary rocks in eastern Heilongjiang Province, NE China: Implications for the tectonic evolution of the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt. Tectonophysics, 485: 42–51

Orolmaa D, Erdenesaihan G, Borisenko A S, Fedoseev G S, Babich V V, Zhmodik S M. 2008. Permian-Triassic granitoid magmatism and metallogeny of the Hangayn (central Mongolia). Rus Geol Geophys, 49: 534–544

Paterson S R, Ducea M N. 2015. Arc magmatic tempos: Gathering the evidence. Elements, 11: 91–98

Petford N, Cruden A R, Mccaffrey K J, Vigneresse J L. 2000. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. Nature, 408: 669–673

Pitcher W S. 1997. The Nature and Origin of Granite. 2nd ed. London: Chapman & Hall. 358

Richards J P, Kerrich R. 2007. Special paper: Adakite-Like rocks: Their diverse origins and questionable role in Metallogenesis. Econ Geol, 102: 537–576

Roberts N M W, Van Kranendonk M J, Parman S, Clift P D. 2015. Continent formation through time. Geol Soc Lond Spec Publ, 389: 1–16

Rudnick R L. 1995. Making continental crust. Nature, 378: 571–578

Sun D Y, Gou J, Wang T H, Ren Y S, Liu Y J, Guo H Y, Liu X M, Hu Z C. 2013. Geochronological and geochemical constraints on the Erguna Massif basement, NE China-subduction history of the Mongol-Okhotsk oceanic crust. Int Geol Rev, 55: 1801–1816

Tang J, Xu W L, Wang F, Wang W, Xu M J, Zhang Y H. 2013. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic magmatism in the Erguna Massif, NE China: Petrogenesis and implications for the breakup of the Rodinia supercontinent. Precambrian Res, 224: 597–611

Tang J, Xu W L, Wang F, Wang W, Xu M J, Zhang Y H. 2014. Geochronology and geochemistry of Early-Middle Triassic magmatism in the Erguna Massif, NE China: Constraints on the tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean. Lithos, 184-187: 1–16

Tang J, Xu W L, Wang F, Zhao S, Li Y. 2015. Geochronology, geochemistry, and deformation history of Late Jurassic-Early Cretaceous intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China: Constraints on the late Mesozoic tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk orogenic belt. Tectonophysics, 658: 91–110

Tang J, Xu W L, Wang F, Zhao S, Wang W. 2016. Early Mesozoic southward subduction history of the Mongol-Okhotsk oceanic plate: Evidence from geochronology and geochemistry of Early Mesozoic intrusive rocks in the Erguna Massif,, NE China. Gondwana Res, 31: 218–240

Taylor S R, Mclennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution, an Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks. Oxford: Blackwell Scientific Publications. 312

Wang F, Xu W L, Gao F H, Meng E, Cao H, Zhao L, Yang Y. 2012a. Tectonic history of the Zhangguangcailing Group in eastern Heilongjiang Province, NE China: Constraints from U-Pb geochronology of detrital and magmatic zircons. Tectonophysics, 566-567: 105–122

Wang F, Xu W L, Meng E, Cao H H, Gao F H. 2012b. Early Paleozoic amalgamation of the Songnen-Zhangguangcai Range and Jiamusi massifs in the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt: Geochronological and geochemical evidence from granitoids and rhyolites. J Asian Earth Sci, 49: 234–248

Wang F, Xu W L, Xu Y G, Gao F H, Ge W. 2015. Late Triassic bimodal igneous rocks in eastern Heilongjiang Province, NE China: Implications for the initiation of subduction of the Paleo-Pacific Plate beneath Eurasia. J Asian Earth Sci, 97: 406–423

Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. Earth Planet Sci Lett, 64: 295–304

Watson E B, Harrison T M. 2005. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth. Science, 308: 841–844

Windley B F, Alexeiev D, Xiao W, Kroner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the central Asian orogenic belt. J Geol Soc, 164: 31–47

Windley B F, Allen M B, Zhang C, Zhao Z Y, Wang G R. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan Range, central Asia. Geology, 18: 128–131

Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W C, Sun D Y. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): IsotopicIsotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. Lithos, 67: 191–204

Wu F Y, Jahn B M, Wilde S, Sun D Y. 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. Tectonophysics, 328: 89–113

Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, Grant M L, Wilde S A, Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. J Asian Earth Sci, 41: 1–30

Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. Chem Geol, 187: 143–173

Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, Yang J H, Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. Chem Geol, 234: 105–126

Wu F Y, Zhao G C, Sun D Y, Wilde S A, Yang J H. 2007. The Hulan

Group: Its role in the evolution of the Central Asian orogenic belt of NE China. J Asian Earth Sci, 30: 542–556

Xiao W J, Windley B F, Hao J, Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. Tectonics, 22: 1069

Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, Sun S, Li J L. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia. Am J Sci, 304: 370–395

Xu W L, Ji W Q, Pei F P, Meng E, Yu Y, Yang D B, Zhang X Z. 2009. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin Provinces, NE China: Chronology, geochemistry, and tectonic implications. J Asian Earth Sci, 34: 392–402

Xu W L, Pei F P, Wang F, Meng E, Ji W Q, Yang D B, Wang W. 2013. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes. J Asian Earth Sci, 74: 167–193

Yakubchuk A. 2002. The Baikalide-Altaid, Transbaikal-Mongolian and North Pacific orogenic collages: Similarity and diversity of structural patterns and metallogenic zoning. Geol Soc Lond Spec Publ, 204: 273–297

Yakubchuk A. 2004. Architecture and mineral deposit settings of the Altaid orogenic collage: A revised model. J Asian Earth Sci, 23: 761–779

Yang J H, Wu F Y, Shao J A, Wilde S A, Xie L W, Liu X M. 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. Earth Planet Sci Lett, 246: 336–352

Yarmolyuk V V, Kovalenko V I, Salnikova E B, Budnikov S V, Kovach V P, Kotov A B, Ponomarchuk V A. 2002. Tectono-magmatic zoning, magma sources, and geodynamics of the Early Mesozoic Mongolia-Transbaikal Province. Geotectonics, 36: 293–311

Yu J J, Wang F, Xu W L, Gao F H, Pei F P. 2012. Early Jurassic mafic magmatism in the Lesser Xing'an-Zhangguangcai Range, NE China, and its tectonic implications: Constraints from zircon U-Pb chronology and geochemistry. Lithos, 142-143: 256–266

Zhao S, Xu W L, Tang J, Li Y, Guo P. 2016. Timing of formation and tectonic nature of the purportedly Neoproterozoic Jiageda Formation of the Erguna Massif, NE China: Constraints from field geology and U-Pb geochronology of detrital and magmatic zircons. Precambrian Res, 281: 585–601

Zhao S, Xu W L, Wang W, Tang J, Zhang Y H. 2014. Geochronology and geochemistry of Middle-Late Ordovician granites and gabbros in the Erguna region, NE China: Implications for the tectonic evolution of the Erguna Massif. J Earth Sci-China, 25: 841–853