

吉林省松嫩-张广才岭地块 榆木川辉绿玢岩年代学及其地质意义

冯光英¹, 刘燊², 杨经绥¹, 牛晓露¹

1. 地幔研究中心, 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037;
2. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学 地质学系, 西安 710069

摘要: 为探讨位于兴蒙造山带松嫩-张广才岭地块南部的榆木川辉绿玢岩的成岩时代、构造背景及地质意义, 对其进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 Sr-Nd 同位素测试。结果显示, 榆木川辉绿玢岩的成岩时代为 399 ± 1.8 Ma, 而非前人所指的二叠纪。Sr-Nd 同位素测试结果显示, 该套辉绿玢岩具有相对较低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值 ($0.704439 \sim 0.705518$) 和正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($6.8 \sim 7.9$)。结合前人对该区构造背景的认识, 进一步将松嫩-张广才岭地块与佳木斯地块伸展拉张环境的时间限定为早泥盆世。另外, 东北地区显生宙地壳增生显著, 榆木川辉绿玢岩本身就为地壳增生的产物, 其形成暗示晚古生代早期松嫩-张广才岭地块可能存在一期重要的地壳垂向增生事件。

关键词: 辉绿玢岩; U-Pb 锆石定年; 早泥盆世; 地壳增生

中图分类号: P597+.3 文章编号: 1007-2802(2016)05-1014-08 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.05.022

Zircon U-Pb age and geological significance of the diabase porphyrite from the Yumuchuan area in the Songnen-Zhangguangcailing Block, Jilin, China

FENG Guang-ying¹, LIU Shen², YANG Jing-sui², NIU Xiao-lu¹

1. CARMA, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. State Key Laboratory of Continental Dynamics and Department of Geology/Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: In order to comprehensively discuss the petrogenic age, tectonic setting and geological significance of the Yumuchuan diabase porphyrites in the southern part of the Songnen-Zhangguangcailing block of the Xingmeng orogenic belt, the zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Sr-Nd isotope measurement of the diabase porphyrites have been carried out in this paper. Results show that the zircon LA-ICP-MS U-Pb age of 399 ± 1.8 Ma for the Yumuchuan diabase porphyrites is different from the previously reported K-Ar age (Permian). In addition, these diabase porphyrites have relatively low $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ ratios ($0.704439 \sim 0.705518$) and positive $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values ($6.8 \sim 7.9$). With the combination of results of previous studies, we have suggested that the timing of the extension of the Songnan-Zhangguangcailing and Jiamusi blocks is furtherly constrained to the early Devonian. In addition, as there was significant crustal growth in the NE China in Phanerozoic, the formation of the Yumuchuan diabase porphyrites, which was the direct product of the crustal growth, means that there could be an important event of the vertical crustal growth in the Songnan-Zhangguangcailing block in early stage of the Late Paleozoic.

Key words: diabase porphyrite; Zircon U-Pb age; early-Devonian; crustal growth

吉林松嫩-张广才岭地块位于兴蒙造山带中部, 属于中亚造山带的东段。兴蒙造山带是一个在古生代由多个块体拼合而形成的构造堆叠区, 其演化在古生代主要受古亚洲洋构造域的控制 (Şengör *et*

al., 1993; Şengör and Natal'in, 1996; 李锦轶, 1998; 任纪舜等, 1999; 吴福元等, 1999; 谢鸣谦, 2000), 而中-新生代又叠加了环太平洋构造域的影响。此外, 东北地区显生宙花岗岩极为发育, 被称为巨型

收稿日期: 2015-11-09 收到, 2015-12-17 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41303019, 41373028, 50173022); 中国地质科学院地质研究所基本科研业务 (J1321); 中国地质调查局工作项目 (12120115027201)

第一作者简介: 冯光英 (1983-), 女, 助理研究员, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: fengguangying198@163.com.

花岗岩省(吴福元和曹林,1999;吴福元等,2007;Wu *et al.*, 2011)。大量的研究显示该区花岗质岩石多具有正的 ε_{Nd} 值和低的 Nd 模式年龄,是显生宙地壳增生最强烈的地区之一,其形成与古亚洲洋的演化密切相关(郭锋等,2009)。前人对该区花岗岩以及火山岩进行了大量的研究(洪大卫等,2000;孙德有等,2000,2004;Jahn *et al.*, 2001;Wu *et al.*, 2002;Hong *et al.*, 2004;葛文春等,2005;范蔚茗,2008;Guo *et al.*, 2010;许文良等,2012;Yu *et al.*, 2013),但迄今为止关于兴蒙造山带各块体拼合的时间以及该区地壳增生的方式等问题还存在较大争议。基性岩墙(煌斑岩、辉绿岩和辉绿玢岩等)来自大陆伸展背景,主要由陆下软流圈或岩石圈地幔的岩浆上侵形成,是陆块伸展、甚至裂解的关键遗迹,其元素和同位素地球化学信息,既可反演地球深部岩浆源区的特征,也可陆块的伸展乃至裂解提供有效限制(Windley, 1984; Hall and Fahrig, 1987; 李江海等, 1997; 周鼎武等, 1998, 2000; 侯贵廷等, 2009; 刘燊等, 2010)。但目前为止对该区基性-超基性岩的研究较为薄弱,且主要集中在晚古生代-早中生代(Wu *et al.*, 2004; 张广良和吴福元, 2005; 刘燊等, 2009; Liu *et al.*, 2010a; 冯光英等, 2011)。吉林榆木川辉绿玢岩出露面积较大,是松嫩-张广才岭地块非常重要的基性岩墙。前人对其进行了详细的地球化学研究(冯光英等, 2010),但其年代学为全岩 K-Ar 定年结果,由于基性岩墙通常钾含量较低,且极易蚀变导致氩的丢失和混染,因此 K-Ar 年龄往往存在较大的误差。鉴于此,笔者在前人研究的基础上对榆木川辉绿玢岩重新进行锆石 U-Pb 定年,并对其 Sr-Nd 同位素重新校正,得出了新的认识,对揭示该区构造演化历史具有重要意义。

1 地质背景

兴蒙造山带夹持于北部的西伯利亚板块和南部的华北克拉通之间,属于巨型中亚造山带的东段,是了解中亚造山带演化及古亚洲洋俯冲过程和最终闭合时间的重要窗口。兴蒙造山带是一个在古生代-中生代期间由位于两大板块之间的中、小块体拼合而形成的构造堆叠区(王荃等,1991;Shao *et al.*, 1997; 李锦轶, 1998)。根据塔源—喜桂图断裂、贺根山—黑河断裂和牡丹江断裂可以将该区划分为额尔古纳地块、兴安地块、松嫩-张广才岭地块、佳木斯地块和兴凯地块(图 1a)。整个兴蒙造山带的演化在古生代期间主要受到古亚洲洋构造域的控

制(Şengör *et al.*, 1993; Şengör and Natal'in, 1996; 李锦轶, 1998; 任纪舜等, 1999; 吴福元等, 1999; 谢鸣谦, 2000),而中-新生代又叠加了环太平洋构造域的影响,特殊的大地构造位置、复杂的地质演化历史使得该区成为国内外地质学家研究的热点地区。

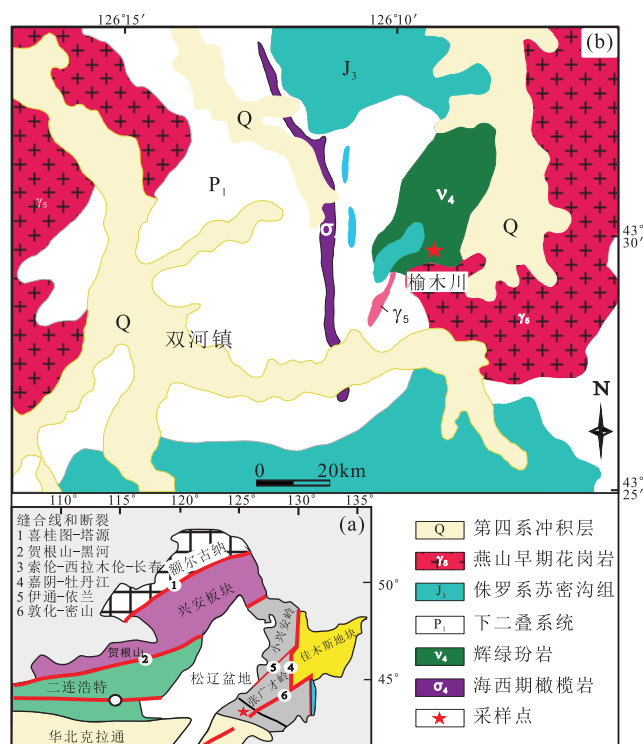


图1 东北地区主要块体分布(a)(据周琴等(2007)和研究区地质简图(b)

Fig.1 Simplified geological map of NE China, showing the main tectonic subdivisions(after Zhou Qin *et al.*, 2007) (a) and the simplified geological map of the studied area(b)

松嫩地块位于兴蒙造山带的中部,西与兴安褶皱带相接,东与佳木斯地块拼贴;其西部松辽盆地大多被掩盖在晚中生代至新生代松辽盆地的年轻沉积物之下,基底主要由浅变质-未变质的古生代地层、花岗岩和片麻岩组成,花岗岩形成于晚古生代和晚中生代,基本不含古老锆石残留,表明松辽盆地不具备大规模前寒武纪结晶基底(吴福元等, 2000);东部被北东向的依兰-伊通断裂分成2个地质面貌不同的地块—小兴安岭地块和张广才岭地块(唐克东等, 2011)。

张广才岭地块出露的地层及岩石类型主要为泥盆-志留系呼兰群中-浅变质岩(云母片岩类、片麻岩类、角闪岩和大理岩类),原岩主要为泥质沉积岩、凝灰岩、碱性玄武岩和灰岩(施性明和兰玉琦, 1985; 孟繁兴, 1992),变质岩周围被大量的显生宙花岗岩分割和包围(孙德有等, 2001),传统认识认

为这些花岗岩主要形成于加里东期和海西期,近20年来随着高精度定年技术的发展,发现这些花岗岩主要形成于晚二叠世-早中生代(吴福元等,1998,2000; Wu *et al.*, 2000, 2002, 2003a, 2011; 孙德有等, 2001, 2005; Yu *et al.*, 2013)。

2 样品和分析方法

本次研究共采集辉绿玢岩样品28件,选择其中的10件样品进行Sr-Nd同位素测试。此外采集大样约50 kg,挑选锆石约100粒用于LA-ICP-MS锆石U-Pb定年。榆木川基性岩的主要岩性为辉绿玢岩,具典型的斑状结构,基质为隐晶质-微晶结构,块状构造,主要矿物组成为单斜辉石(40%~45%)和基性斜长石(50%~55%)。斑晶由他形或半自形的单斜辉石(1.5~2.0 mm, 13%~15%)、斜长石(1.0~2.0 mm, 20%~25%)和少量的斜方辉石(1.0~2.0 mm, 2%~3%)组成。基质由单斜辉石(0.06~0.1 mm, 25%~35%)、斜方辉石(0.05~0.1 mm, 3%~5%)、斜长石(0.03~0.06 mm, 30%~35%)、少量黑云母(0.04~0.06 mm, 2%~4%)和Fe-Ti氧化物(磁铁矿或钛铁矿)(0.04~0.06 mm, 3%~5%)组成。镜下无堆晶结构现象,样品较新鲜,没有明显的蚀变(烧失量0.5%~2.2%)(冯光英等,2010)。

锆石经手工碎样、常规重力浮选和电磁选方法分选,然后将锆石粘贴在环氧树脂表面,打磨抛光后使其露出内部结构,进行阴极发光和背散射扫描电子显微镜显微照相。锆石LA-ICP-MS U-Pb同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成。使用仪器为ICP-MS为Agilent 7500a,激光剥蚀系统为GeoLas 2005,以氦气作载气、氩气作补偿气调节灵敏度(熊光强等,2014)。详细的仪器操作条件和数据处理方法见Liu等(2008, 2010b)。锆石标样91500的U-Th-Pb同位素比值推荐值据Wiedenbeck等(1995)。锆石样品的U-b年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用Isoplot/Ex_ver3(Ludwig, 2003)完成。

Sr-Nd同位素测定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的同位素实验室完成,所用仪器为MAT-261热电离蒸发固体质谱计(TIMs),实验流程参见张永清等(2008),Sm、Nd和Rb、Sr的过程空白值分别小于200 pg和小于500 pg,所有样品的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 统一采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 以及 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 进行标准化处理(Depaolo, 1988)。分析过程中NBS987 Sr标

准和La JollaNd标准分别为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710248\pm 12$ ($2\sigma, n=10$)和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.511856\pm 10$ ($2\sigma, n=10$)。

3 分析结果

3.1 年代学

长期以来,榆木川辉绿玢岩一直缺乏高精度定年结果,在1:20万区域地质报告中基于其与地层之间的接触关系将其形成时代标注为海西晚期(吉林省地质矿产局,1988),但由于古生代期间该区处于两大板块(西伯利亚板块和华北板块)的最终拼合接触带,古生代地层多为混杂堆积,利用侵入体与地层的接触关系来限定侵入岩的形成时代往往得出错误的认识(Şengör and Natal'in, 1996; 王枫等, 2009)。此外,前人对其进行了K-Ar定年,结果约为260 Ma(冯光英等,2010),由于该区处于古亚洲洋构造域和环太平洋构造域的叠加部位,多期改造的影响使其缺乏可信度(王枫等,2009)。为了对其进行高精度U-Pb锆石定年,笔者采集了约50 kg的大样进行锆石分选,成功分选出约100粒锆石。其中代表性锆石阴极发光图像如图2所示,锆石大多呈浑圆状或长条状,长条状锆石多呈不完整的破碎状,两者都具有清晰的生长环带。所测试锆石的Th/U值均大于0.1(0.58~0.88)(表1),具有岩浆锆石的特征。11个分析点均位于U-Pb谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 399.0 ± 1.8 Ma(图2),代表了该岩体的结晶年龄,表明其为早海西期早泥盆世岩浆活动的产物。

3.2 Sr-Nd同位素

由榆木川辉绿玢岩Sr-Nd同位素分析结果

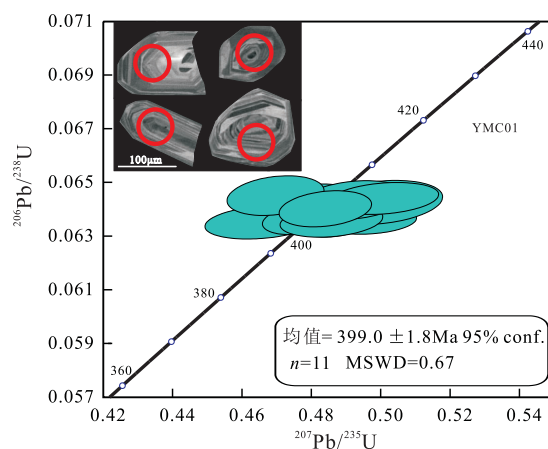


图2 榆木川辉绿玢岩中代表性锆石的CL图像及锆石的LA-ICP-MS谐和年龄

Fig.2 Cathodoluminescence (CL) images and LA-ICP-MS U-Pb ages of representative zircons from the Yumuchuan diabase porphyrites

表 1 榆木川辉绿玢岩锆石 U-Pb 年龄
Table 1 Zircon U-Pb age of the Yumuchuan diabase porphyrites

YMC01	Th	U	Pb	Th/	同位素比值						t/Ma					
点号	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
1	189	287	62.3	0.66	0.0565	0.0012	0.4973	0.0105	0.0635	0.0004	473	36	410	7	397	2
2	331	439	106	0.75	0.0553	0.0010	0.4864	0.0090	0.0636	0.0005	425	27	402	6	397	3
3	113	196	38.6	0.58	0.0534	0.0017	0.4654	0.0135	0.0635	0.0005	345	51	388	9	397	3
4	218	269	68.9	0.81	0.0566	0.0018	0.4995	0.0148	0.0643	0.0007	475	47	411	10	401	4
5	252	371	83.6	0.68	0.0540	0.0011	0.4800	0.0102	0.0643	0.0005	370	33	398	7	402	3
6	394	449	120	0.88	0.0542	0.0010	0.4760	0.0085	0.0636	0.0004	378	28	395	6	397	3
7	304	396	98.1	0.77	0.0552	0.0014	0.4855	0.0122	0.0636	0.0005	421	42	402	8	397	3
8	203	249	64.7	0.82	0.0554	0.0015	0.4918	0.0129	0.0643	0.0006	426	42	406	9	402	4
9	219	285	71.3	0.77	0.0526	0.0013	0.4693	0.0115	0.0645	0.0006	313	39	391	8	403	4
10	201	307	68.8	0.65	0.0562	0.0014	0.5007	0.0130	0.0644	0.0005	459	44	412	9	402	3
11	90	153	34.9	0.59	0.0547	0.0012	0.4838	0.0109	0.0640	0.0006	400	35	401	7	400	3

(表 2) 可见, 其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.705 381~0.705 773, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值较低在 0.704 439~0.705 518 之间, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为 0.512 472~0.512 529, 并具有正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(6.8~7.9), 具有亏损地幔源区的特征, 同时其二阶段亏损模式年龄在 409~548 Ma。

4 讨论

4.1 岩石成因及构造意义

榆木川辉绿玢岩的地球化学特征已另文刊出, 分析结果表明其稀土元素配分模式为轻稀土略微亏损的平坦性, 与 N-MORB 稀土配分模式基本一致, 同时具有较低的 Sr 初始比值以及较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 这些特征都指示其来源于同位素长期亏损的地幔源区, 此外其微量元素特征还显示流体交代的痕迹, 同古亚洲洋俯冲作用相关。MgO 与 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i

以及 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 之间没有明显的相关性, 可见岩浆在上升过程中基本没有受到地壳混染的影响(冯光英等, 2010), 这与基性岩墙形成于伸展拉张环境, 上升速度较快有关。据此, 笔者认为早泥盆世松嫩-张广才岭地块处于造山后的伸展拉张阶段。

松嫩-张广才岭地块东北缘为佳木斯地块, 南缘为华北克拉通。如前所述, 笔者认为在早泥盆世张广才岭地块处于造山后的伸展拉张阶段, 那么这一环境的形成是由于松嫩-张广才岭地块同佳木斯地块的碰撞拼合还是由于其与华北克拉通之间的碰撞拼合呢? 大量事实表明, 兴蒙造山带并非简单的西伯利亚板块与华北板块之间的缝合带, 而是由位于两大板块之间的中、小块体群组成的构造拼合带(王荃等, 1991; Shao *et al.*, 1997; 李锦轶, 1998)。而这些中小块体之间的拼合主要是受到古亚洲洋

表 2 榆木川辉绿玢岩 Sr-Nd 同位素组成
Table 2 Sr-Nd isotopic compositions of the Yumuchuan diabase porphyrites

样号	Rb / $\times 10^{-6}$	Sr / $\times 10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) _i	Sm / $\times 10^{-6}$	Nd / $\times 10^{-6}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) _i	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM2}
YMC-03	8.80	123	0.2070	0.705 615	3	0.704 439	2.77	7.89	0.2123	0.512 504	2	0.512 504	7.4	536
YMC-04	1.48	121	0.0354	0.705 574	2	0.705 373	2.58	7.38	0.2114	0.512 498	3	0.512 498	7.3	548
YMC-07	10.2	145	0.2035	0.705 638	3	0.704 482	3.20	8.96	0.2159	0.512 500	2	0.512 500	7.3	409
YMC-12	11.1	247	0.1300	0.705 584	7	0.704 846	3.87	10.8	0.2167	0.512 495	4	0.512 495	7.2	412
YMC-14	2.46	159	0.0448	0.705 773	5	0.705 518	3.44	9.81	0.2120	0.512 509	2	0.512 509	7.5	529
YMC-16	3.88	178	0.0631	0.705 422	6	0.705 064	3.04	8.89	0.2068	0.512 529	5	0.512 529	7.9	501
YMC-18	3.59	186	0.0558	0.705 436	6	0.705 119	3.27	9.11	0.2170	0.512 491	4	0.512 491	7.2	413
YMC-21	2.00	118	0.0490	0.705 381	4	0.705 103	2.77	7.59	0.2207	0.512 472	3	0.512 473	6.8	428
YMC-24	2.34	124	0.0546	0.705 416	4	0.705 106	3.29	9.08	0.2191	0.512 485	2	0.512 485	7.1	422
YMC-28	2.92	163	0.0518	0.705 439	4	0.705 144	3.64	10.7	0.2057	0.512 501	3	0.512 501	7.4	545

注: 测试值引自冯光英等(2010), 表中以 $t=399\text{ Ma}$ 来对 Sr, Nd 同位素加以校正。

俯冲作用的控制。目前对于古亚洲洋最后闭合的时间和地点,主要有 2 种观点:一部分学者认为位于兴安地块和松辽地块之间的贺根山-黑河缝合带代表了华北克拉通和西伯利亚板块之间的最后缝合带,古地磁数据指示,华北克拉通最初沿着贺根山-黑河带同蒙古大陆拼合,随后在晚泥盆纪-早石炭纪这一组合大陆最终沿蒙古-鄂霍茨克带同西伯利亚板块碰撞 (Mueller *et al.*, 1991; Zorin, 1999; Kravchinsky *et al.*, 2002)。另外一些学者认为,位于松辽和辽源地块之间的索伦-林西-长春缝合带为古亚洲洋最后的缝合带 (Wang and Liu, 1986, 1991; Huang, 1991),主要证据为沿这一缝合线的硅质岩中发现了二叠纪放射虫 (王玉净和樊志勇, 1997),明显晚于贺根山-黑河缝合带发现的中晚泥盆纪或早古生代放射虫 (Robinson *et al.*, 1999),表明这一缝合带可能形成于晚二叠世,代表了古亚洲洋闭合的最终缝合线,这一认识同 Xiao 等 (2003) 和 Chen 等 (2009) 的观点一致。以上 2 种观点中华北克拉通和兴蒙造山带的拼合都晚于早泥盆世,因此,榆木川辉绿玢岩的形成不可能是由于松嫩-张广才岭地块和华北克拉通之间碰撞拼合后的伸展拉张,而很可能是由于松嫩-张广才岭地块和佳木斯地块之间碰撞拼合后的伸展拉张。

关于松嫩-张广才岭地块和佳木斯地块之间碰撞拼合的时间主要存在以下几种观点:一种观点认为佳木斯地块在早古生代可能为冈瓦纳大陆的边缘,随后向北漂移,最终在侏罗纪同亚洲大陆拼合 (Wilde *et al.*, 1997; Wu *et al.*, 2011); 而 Zhou 等 (2009) 认为佳木斯地块更像是中亚造山带东北延伸的裂谷,而不是来自冈瓦纳的外来地块,这个裂谷形成于 260 Ma 之前,随后佳木斯地块和松辽盆地在 210 Ma 之前碰撞拼合,但其拼合不是由于西伯利亚板块和华北克拉通之间的俯冲,而是由于太平洋的俯冲。无论是由于古亚洲洋的俯冲还是古太平洋的俯冲。这 2 种观点代表的时间都晚于古生代;而许文良等 (2012) 等通过对早古生代火成岩的研究,认为松嫩-张广才岭地块和佳木斯地块与中志留世 (425 Ma) 已经拼合在一起,这一观点也得到早泥盆世地层碎屑锆石年代学的支持 (Meng *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2012; 许文良等, 2012),此外对松嫩-张广才岭地块东缘 A 型流纹岩以及佳木斯地块双峰式火山岩的研究发现 2 者都形成于中泥盆世 (约 386 Ma) (孟恩等, 2011),它们共同揭示此时该区处于一种碰撞后的伸展环境。笔者认为这一观点能够合理的解释榆木川辉绿玢岩的形成,同时由

于其形成时代略早 (399 ± 1.8 Ma),因此推断松嫩-张广才岭地块在早泥盆世已经处于伸展后的拉张环境。

4.2 地壳增生

地壳增生是指幔源岩浆及其分异产物通过各种地质过程添加到地壳中,导致地壳体积和面积增加。其方式主要有 2 种:①俯冲带岩浆弧杂岩的侧向增生,主要是指围绕古陆的向洋增生,俯冲作用贯穿了从新生地壳形成到弧陆碰撞导致大陆增生的主要阶段 (张晓晖和翟明国, 2010; Schulmann and Paterson, 2011, 以及其中的文献);②垂向增生,是地幔岩浆对地壳的直接补给,与大陆裂解及后碰撞-后造山阶段幔源玄武质岩浆底垫的过程有关 (张晓晖和翟明国, 2010)。目前,对大陆地壳生长机制的认识有 2 种截然不同的模型:①为“侧向增生模型”,类似于环太平洋增生造山带,大陆地壳的生长基本通过大洋板块俯冲诱导的增生造山完成;②为“双向增生模型,即洋陆体制的侧向增生+后碰撞垂向增生”,不仅承认洋陆俯冲体制下的侧向增生过程,特别强调后碰撞大陆地壳在深部幔源物质底垫过程中的垂向生长 (Gao *et al.*, 2011; Long *et al.*, 2011)。

对东北地区地壳增生问题的关注始于对花岗岩的研究 (吴福元等, 1999; Wu *et al.*, 2000, 2002, 2003b; 葛文春等, 2007; 刘燊等, 2009; Liu *et al.*, 2010a),它们低的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 和正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,表明其形成与地幔有着十分重要的联系,而且普遍具有年轻的 Nd 模式年龄 (<1000 Ma),暗示年轻地壳组分的重要贡献和区域在显生宙发生了强烈的地壳增生作用,这也是东北地区与华北克拉通的重要区别 (Wu *et al.*, 2000, 2002, 2003b, 周琴等, 2007; 范蔚茗等, 2008), Sr-Nd 同位素填图显示东北地区确实存在明显的地壳增生作用,但由于其多块体拼合的特点,不同块体的增生强度和方式可能存在差异,总体而言地壳增生主要发生在中侏罗世之前,局部的地壳增生作用可能一直持续到早白垩世,主要出现在活动深大断裂带或古缝合带区域 (范蔚茗等, 2008)。详细的研究表明来自佳木斯地块的样品,有较老的模式年龄 (约 1600 Ma) (Wu *et al.*, 2000),对额尔古纳几个花岗岩体的研究表明,其二阶段 Hf 模式年龄介于 1.1 ~ 1.4 Ga (葛文春等, 2007),而在松辽和兴安陆块,大多数样品的模式年龄低于 1000 Ma (隋振民等, 2007),清楚地表明了这些地区地壳的新生特征。

而对于具有这些特征的花岗岩的岩石成因,由

于其大面积分布,所以不可能直接来自于地幔,而是必然存在地幔热源的贡献,所以一个合理的解释是由于大量岩浆以板底垫托形式就位于地壳底部,并促使上覆的先存年轻地壳发生部分熔融形成花岗质岩浆,如此过程多次进行,从而形成大面积的花岗岩,这一方式与欧洲海西造山带的情况有所类似(Costa and Rey, 1995; 吴福元等,1999;)。

松嫩-张广才岭地块晚古生代-早中生代花岗岩主要是板块拼合之后形成的,后造山岩浆形成必然需要新的动力学及热源,幔源岩浆底侵是最常见的后造山岩浆活动的热源和物源,在中亚造山带很多地带已经鉴别出后碰撞或后造山阶段的幔源物质添入(Han *et al.*, 1997; Jahn *et al.*, 2000a, 2000b; Wang *et al.*, 2004; Kovalenko *et al.*, 2004;),在上地壳中表现出来的幔源岩浆活动是这个深部地质过程的浅部反映,而该时期发育的基性岩墙,无疑可为其提供证据(韩宝福等,1998; 吴福元等,1999; 王涛等,2008)。榆木川辉绿玢岩形成于早泥盆世,源区为亏损地幔,其模式年龄与形成年龄相差较小,表明其从亏损地幔中分离出的时间较短。其本身就是地壳增生的产物,而其形成也表明松嫩-张广才岭地块在晚古生代早期可能存在一个重要的地壳增生事件,且其增生方式为垂向增生。

5 结论

(1) LA-ICP-MS 定年结果显示,位于松嫩-张广才岭地块的榆木川辉绿玢岩的形成时代为 399 ± 1.8 Ma,而不是前人所认为的二叠纪;结合前人对该区构造背景的认识,笔者进一步将松嫩-张广才岭地块与佳木斯地块碰撞拼合后处于伸展后拉张环境的时间限制为早泥盆世。

(2) Sr-Nd 同位素研究表明,榆木川辉绿玢岩具有低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值($0.704439 \sim 0.705518$)以及正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($6.8 \sim 7.9$);其形成表明松嫩-张广才岭地块在晚古生代早期可能存在一个重要的地壳增生事件,且其增生方式为垂向增生。

参考文献 (References):

Chen L, Cheng C, Wei Z G. 2009. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 286(1-2): 171-183

Costa S, Rey P. 1995. Lower crustal rejuvenation and growth during post-thickening collapse: Insights from a crustal cross section through a Variscan metamorphic core complex. *Geology*, 23(10): 905-908

DePaolo D J. 1988. Neodymium isotope geochemistry. Berlin Heidelberg:

Springer-Verlag, 76-80

Gao J, Klemm R, Qian Q, Zhang X, Li J L, Jiang T, Yang Y Q. 2011. The collision between the Yili and Tarim blocks of the Southwestern Altaids: Geochemical and age constraints of a leucogranite dike crosscutting the HP-LT metamorphic belt in the Chinese Tianshan Orogen. *Tectonophysics*, 499(1-4): 118-131

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(3-4): 563-578

Hall H C, Fahrig W F. 1987. Mafic dyke swarms. Toronto, Canada: Geological Association of Canada Special Paper, 34: 1-503

Han B F, Wang S G, Jahn B M, Hong D W, Kagami H, Sun Y L. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur river A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 197, 138(3-4): 135-159

Hong D W, Zhang J S, Wang T, Wang S G, Xie X L. 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: Evidence from the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Science*, 23(5): 799-813

Huang B H. 1991. Biogeography of late Paleozoic floras of northeastern China. In: Ishii K, Liu X Y, Ichikawa K, Huang B H (eds). *Pre-Jurassic geology of Inner Mongolia, China*. Osaka: China-Japan Co-operative Group, 159-174

Jahn B M, Wu F Y, Hong D W. 2000a. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia. *Proc. Journal of Earth System Science*, 109(1): 5-20

Jahn B M, Wu F Y, Chen B. 2000b. Massive granitoid generation in central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23(2): 82-92

Jahn B M, Wu F Y, Capdevila R, Martineau F, Zhao Z H, Wang Y X. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China. *Lithos*, 59(4): 171-198

Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kovach V P, Kotov A B, Kozakov I K, Salnikova E B, Larin A M. 2004. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian Mobile Belt: Geological and isotopic evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 605-627

Kravchinsky V A, Cogné J P, Harbert W P, Kuzmin M I. 2002. Evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean as constrained by new palaeomagnetic data from the Mongol-Okhotsk suture zone, Siberia. *Geophysical Journal International*, 148(1): 34-57

Liu S, Hu R Z, Gao S, Feng C X, Feng G Y, Coulson I M, Li C, Wang T, Qi Y Q. 2010a. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of Permian granodiorite and associated gabbro in the Songliao Block, NE China and implications for growth of juvenile crust. *Lithos*, 114(3-4): 423-436

Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G, Chen H H. 2008. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43

Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 2010b. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interac-

- tions 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
- Long L L, Gao J, Klemm R, Beier C, Qian Q, Zhang X, Wang J B, Jiang T. 2011. Geochemical and geochronological studies of granitoid rocks from the Western Tianshan Orogen: Implications for continental growth in the southwestern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 126(3-4): 321-340
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley, California: Berkeley Geochronology Center, California
- 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(1-4): 42-51
- Mueller J F, Rogers J J W, Jin Y G, Wang H Y, Li W G, Chronic J, Mueller J F. 1991. Late Carboniferous to Permian sedimentation in Inner Mongolia, China, and tectonic relationships between North China and Siberia. *Journal of Geology*, 99(2): 251-263
- Robinson P T, Zhou M F, Hu X F, Reynolds P, Bai W J, Yang J S. 1999. Geochemical constraints on the origin of the Hegenshan ophiolite, Inner Mongolia, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17(4): 423-442
- Schulmann K, Paterson S. 2011. Geodynamics: Asian continental growth. *Nature Geoscience*, 4(12): 827-829
- Şengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299-307
- Şengör A M C, Natal'in B A. 1996. Paleotectonics of Asia: Fragments of a Synthesis. In: Yin A, Harrison T M, eds. 1996. The tectonic evolution of Asia. Cambridge: Cambridge University Press, 486-641
- Shao J A, Mu B L, He G Q, Zhang L Q. 1997. Geological effects in tectonic superposition of Paleo-Pacific domain and Paleo-Asian domain in northern part of north China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 40(6): 634-640
- Wang F, Xu W L, Meng E, Cao H H, Gao F H. 2012. Early Paleozoic amalgamation of the Songnen-Zhangguangcai Range and Jiamusi massifs in the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt: Geochronological and geochemical evidence from granitoids and rhyolites. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 234-248
- Wang Q, Liu X Y. 1986. Paleoplate tectonics between Cathaysia and Angaraland in Inner Mongolia of China. *Tectonics*, 5(7): 1073-1088
- Wang Q, Liu X Y. 1991. Pre-Jurassic tectonic evolution between Cathaysia and Angaraland in Inner Mongolia of China. In: Ishii K, Liu X Y, Ichikawa K, Huang B H, eds. Pre-Jurassic geology of Inner Mongolia, China. Osaka: Osaka University, 127-147
- Wang T, Zheng Y D, Li T B, Gao Y J. 2004. Mesozoic granitic magmatism in extensional tectonics near the Mongolian border in China and its implications for crustal growth. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 715-729
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin W L, Meier M, Oberli F, Quadt A V, Roddick J C, Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1-23
- Wilde S A, Dorsett-Bain H L, Liu J L. 1997. The identification of a Late Pan-African granulite facies event in northeastern China: SHRIMP U-Pb zircon dating of the Mashan Group at Liu Mao, Heilongjiang Province, China. In: Proceedings of the 30th IGC: Precambrian geology and metamorphic petrology, vol. 17. Netherlands, Amsterdam: VSP International Science Publishers, 59-74
- Windley B F. 1984. The evolving continents. 2nd ed. New York: John Wiley Sons, 68-218
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, Sun D Y. 2000. Phanerozoic continental crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328(1-2): 89-113
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S A. 2002. A-type granites in Northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1-2): 143-173
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W C, Sun D Y. 2003a. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66(3-4): 241-273
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W C, Sun D Y. 2003b. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67(3-4): 191-204
- Wu F Y, Simon A W, Zhang G L, Sun D Y. 2004. Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complexes in Jilin Province, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 781-797
- 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. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1-30
- 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(6): 1069
- Yu J J, Wang F, Xu W L, Gao F H, Tang J. 2013. Late Permian tectonic evolution at the southeastern margin of the Songnen-Zhangguangcai Range Massif, NE China: Constraints from geochronology and geochemistry of granitoids. *Gondwana Research*, 24(2): 635-647
- Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z, Zhao G C, Zheng C Q, Wang Y J, Zhang X H. 2009. The onset of Pacific margin accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang high-pressure metamorphic belt. *Tectonophysics*, 478(3-4): 230-246
- Zorin Y A. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia. *Tectonophysics*, 306(1): 33-56
- 范蔚茗, 郭锋, 高晓峰, 李超文. 2008. 东北地区中生代火成岩 Sr-Nd 同位素区划及其大地构造意义. *地球化学*, 37(4): 361-372
- 冯光英, 刘燊, 钟宏, 贾大成, 齐有强, 王涛, 杨毓红. 2010. 吉林晚古生代榆木川基性岩的地球化学特征及其岩石成因. *地球化学*, 39(5): 427-438
- 冯光英, 刘燊, 冯彩霞, 贾大成, 钟宏, 于晓飞, 齐有强, 王涛. 2011. 吉林红旗岭超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素特征及岩石成因. *岩石学报*, 27(6): 1594-1606
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, Rahman A A. 2005. 大兴安岭北部塔河花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造归属的制约. *科学通报*, 50(12): 1239-1247

- 葛文春, 隋振民, 吴福元, 张吉衡, 徐学纯, 程瑞玉. 2007. 大兴安岭东北部早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义. 岩石学报, 23(2): 423-440
- 郭锋, 范蔚茗, 李超文, 苗来成, 赵亮. 2009. 早古生代古亚洲洋俯冲作用: 来自内蒙古大石寨玄武岩的年代学与地球化学证据. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39(5): 569-579
- 韩宝福, 何国琦, 王式洸, 洪大卫. 1998. 新疆北部后碰撞幔源岩浆活动与陆壳纵向生长. 地质论评, 44(4): 396-404
- 洪大卫, 王式, 谢锡林, 张季生. 2000. 兴蒙造山带正 $\varepsilon(\text{Nd}, t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. 地学前缘, 7(2): 441-456
- 侯贵廷, Halls H, Davis D, 黄宝珍, 杨默函, 王传成. 2009. 华北基性岩墙群的古地磁极及其哥伦比亚超大陆重建意义. 岩石学报, 25(3): 650-658
- 吉林省地质矿产局. 1988. 吉林省区域地质志. 北京: 地质出版社
- 李江海, 何文渊, 钱祥麟. 1997. 元古代基性岩墙群的成因机制、构造背景及其古板块再造意义. 高校地质学报, 3(3): 272-281
- 李锦轶. 1998. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识. 地质论评, 44(4): 339-347
- 刘燊, 胡瑞忠, 冯彩霞, 冯光英, 于晓飞, 李才, 贾大成, 齐有强, 王涛. 2009. 吉林东部大蒲柴河 adakites 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其意义. 岩石学报, 25(12): 3153-3164
- 刘燊, 胡瑞忠, 冯光英, 杨毓红, 冯彩霞, 齐有强, 王涛. 2010. 华北克拉通中生代以来基性岩墙群的分布及研究意义. 地质通报, 29(2-3): 259-267
- 孟恩, 许文良, 裴福萍, 王枫. 2011. 黑龙江省东部中泥盆世火山作用及其构造意义-来自岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Sr-Nd-Hf 同位素的制约. 岩石矿物学杂志, 30(5): 883-900
- 孟繁兴. 1992. 吉林中部呼兰群泥质岩递进变质带特征及其地质意义. 吉林地质, (3): 60-70
- 任纪舜, 牛宝贵, 刘志刚. 1999. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用. 地学前缘, 6(3): 85-93
- 施性明, 兰玉琦. 1985. 吉林省红旗岭呼兰群变质岩系的研究. 长春地质学院学报, (4): 39-46, 56
- 隋振民, 葛文春, 吴福元, 张吉衡, 徐学纯, 程瑞玉. 2007. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩质岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因. 岩石学报, 23(2): 461-480
- 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(20): 2217-2222
- 孙德有, 吴福元, 林强, 路孝平. 2001. 张广才岭燕山早期白石山岩体成因与壳幔相互作用. 岩石学报, 17(2): 227-235
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 高山. 2004. 西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据. 吉林大学学报(地球科学版), 34(2): 174-181
- 孙德有, 吴福元, 高山, 路孝平. 2005. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约. 地学前缘, 12(2): 263-275
- 唐克东, 邵济安, 李永飞. 2011. 松嫩地块及其研究意义. 地学前缘, 18(3): 57-65
- 王枫, 许文良, 刘军, 裴福萍, 曹花花. 2009. 吉林中部烟筒山早白垩世辉长闪长岩的年代学和地球化学. 世界地质, 28(4): 403-413
- 王荃, 刘雪压, 李锦轶. 1991. 中国内蒙古中部的古板块构造. 中国地质科学院院报, (22): 1-19
- 王涛, 李伍平, 李金宝, 洪大卫, 童英, 李舫. 2008. 东天山东段同造山到后造山花岗岩幔源组分的递增及陆壳垂向生长意义-Sr、Nd 同位素证据. 岩石学报, 24(4): 762-772
- 王玉净, 樊志勇. 1997. 内蒙古西拉木伦河北部蛇绿岩带中二叠纪放射虫的发现及其地质意义. 古生物学报, 36(1): 58-69
- 吴福元, 林强, 葛文春, 孙德有. 1998. 张广才岭新华电岩体的形成时代与成因研究. 岩石矿物学杂志, 17(3): 226-234
- 吴福元, 曹林. 1999. 东北亚地区的若干重要基础地质问题. 世界地质, 18(2): 1-13
- 吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. 岩石学报, 15(2): 181-189
- 吴福元, 孙德有, 李惠民, 汪筱林. 2000. 松辽盆地基底岩石的锆石 U-Pb 年龄. 科学通报, 45(6): 656-660
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217-1238
- 谢鸣谦. 2000. 拼贴板块构造及其驱动机理: 中国东北及邻区的大地构造演化. 北京: 科学出版社
- 熊光强, 赵洪涛, 刘敏, 张达, 秦晓峰, 王忠, 全立华, 胡兆初. 2014. 内蒙古东乌旗沟特岩体年代学、地球化学及铅同位素特征及其地质意义. 矿物岩石地球化学通报, 33(4): 439-451
- 许文良, 王枫, 孟恩, 高福红, 裴福萍, 于介江, 唐杰. 2012. 黑龙江省东部古生代-早中生代的构造演化: 火成岩组合与碎屑锆石 U-Pb 年代学证据. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1378-1389
- 张广良, 吴福元. 2005. 吉林红旗岭地区造山后镁铁-超镁铁岩体的年代测定及其意义. 地震地质, 27(4): 600-608
- 张晓晖, 翟明国. 2010. 华北北部古生代大陆地壳增生过程中的岩浆作用与成矿效应. 岩石学报, 26(5): 1329-1341
- 张永清, 凌文黎, 李方林. 2008. 峡东地区南华纪-寒武纪地层风化过程元素及 Sr-Nd 同位素演化特征及其地球化学意义. 地球科学-中国地质大学学报, 33(3): 301-312
- 周鼎武, 张成立, 刘颖宇. 1998. 大陆造山带基底岩块中的基性岩墙群研究——以南秦岭武当地块为例. 地球科学进展, 13(2): 151-156
- 周鼎武, 张成立, 刘良, 王居里, 王焰, 刘金平. 2000. 秦岭造山带及相邻地块元古代基性岩墙群研究综述及相关问题探讨. 岩石学报, 16(1): 22-28
- 周琴, 吴福元, 储著银, 杨岳衡, 孙德有, 葛文春. 2007. 吉林蛟河地幔橄辉岩捕虏体的 Sr-Nd-Hf-Os 同位素特征与岩石圈地幔时代. 岩石学报, 23(6): 1269-1280

(本文责任编辑: 龚超颖)