

doi:10.3799/dqkx.2010.107

华北—西伯利亚板块对接带早白垩纪的裂解： 来自西拉木伦断裂带中性岩墙群的锆石 U-Pb 年龄及地球化学证据

李益龙^{1,2}, 周汉文^{1,2*}, 钟增球^{1,2}, 尹淑苹³, 李福林¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘要: 在内蒙古林西县西拉木伦断裂带内发育规模较大的中性岩墙群, 岩墙多呈 NE3°~5°近直立侵入。对岩石进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和详细的岩石地球化学特征研究。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 132.2 ± 2.2 Ma, 岩石侵位于早白垩世。岩石地球化学特征显示岩石具有高钾钙碱性系列—钾玄岩系列的过渡特征, 形成于板内拉张环境, 岩浆源区具有壳幔混源的特征, 是早期俯冲洋壳遭受幔源岩浆底侵作用的结果。岩墙的产状受左旋剪切机制控制, 该机制可能主要与太平洋板块相对亚洲板块的向北运动有关。

关键词: 中性岩墙群; 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年; 地球化学; 西拉木伦断裂带; 内蒙古。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2010)06-0921-12

收稿日期: 2010-05-26

Extension of Suture Zone Between North China and Siberia Craton in Early Cretaceous: Insights from Geochronology and Geochemistry of Intermediate Dykes from Xar Moron Fault Belt in Inner Mongolia

LI Yi-long^{1,2}, ZHOU Han-wen^{1,2*}, ZHONG Zeng-qiu^{1,2}, YIN Shu-ping³, LI Fu-ling¹

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: A large scale of intermediate dykes developed in Xar Moron fault belt in Linxi county, Inner-Mongolia, with NE3° to 5° angle of strike and nearly vertical trend. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating method and whole rock geochemistry test were applied. It is indicated that the intermediate dykes emplaced in Lower Cretaceous with LA-ICP-MS zircon U-Pb age of 132.2 ± 2.2 Ma. The whole rock geochemistry of the dykes reveals transition characteristics between high potassium calc-alkaline series and shoshonite series. They formed in intraplate extensional background and sourced from crust-mantle magmatic mixing, which result from the mantle magma underplating below the early subducted oceanic crust. The strike of the dykes was chronically controlled by a sinistral shear mechanism in the area, which might be related to the northward movement of Pacific plate to Asian plate.

Key words: intermediate dykes; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; geochemistry; Xar Moron fault belt; Inner-Mongolia.

基金项目: 国家重点基础研究“973”项目(No. 2007CB411307); 中国地质调查局项目(No. 1212010510507)。

作者简介: 李益龙(1983—), 男, 博士生, 研究方向为变质岩石学。E-mail: yilong_l@yahoo.com.cn.

* 通讯作者: 周汉文, E-mail: hwzhou@cug.edu.cn

岩墙群为同一岩浆事件中侵位的与火山岩对应的一系列岩墙组合,是地壳伸展体制下深源岩浆浅部就位的产物(邵济安和张履桥,2002)。地表数量最大的是基性岩墙群,岩石类型以辉绿岩、辉绿玢岩、煌斑岩为主,少量为辉长岩或角闪辉长岩,大多数岩浆来源于地幔,因此人们把它们看作是探讨深部作用的重要研究对象(Halls, 1982)。而中酸性岩浆岩的成因非常复杂,可以是基性岩浆结晶分异、中上地壳岩石熔融、或中下地壳深熔作用的产物(路凤香和桑隆康,2002),对它的研究不仅有助于恢复岩浆侵位时的构造环境,还可以提供有关壳幔演化的信息,可以作为研究壳幔相互作用的最直接的对象。

在内蒙古林西县西拉木伦断裂带内发育规模较大的中性—基性岩墙群,该断裂带是华北板块与西伯利亚板块对接活动带的一部分,经历了古生代西伯利亚板块与华北板块对接的构造演化过程,涉及加里东期和海西期多期造山作用和至少两次岛弧增生作用。进入中生代,在华北东部由侏罗纪到白垩纪的构造应力场的转变过程中,该地区经受了强烈的改造。翟明国等(2003)通过同位素年代、岩石、构造和盆地分析等综合研究,提出华北中生代构造体制转折始于 150~140 Ma,终于 110~100 Ma,高峰期是 120 Ma,总体上是由挤压构造体制转化为伸展构造体制,由 EW 向转变为 NNE 向的盆岭构造格局。对构造体制转折的成因和机制,仍存在众多说法,如:太平洋板块俯冲的远程效应(赵越,1990;胡受奚等,1994;郑亚东等,2000)、大规模区域性旋转剪切构造作用(马宗晋和王国权,1999)、地幔柱构造或岩石圈拆沉或根—柱构造(邓晋福等,1996; Zheng *et al.*, 2001)等,以及可能存在的在中国大陆东南侧的特提斯洋盆的闭合(吴根耀,2002)或与特提斯相通的古太平洋闭合及西太平洋小陆块的碰撞和消失(任纪舜等,1997, 1999)、邻近块体的综合作用(翟明国等,2001, 2004)及天体事件(张宏仁,1998)等。

林西地区的中性—基性岩墙群普遍侵入于三叠纪及更早的地质单元中,表明岩墙群为中生代的产物,其侵位机制很可能受到侏罗纪到白垩纪的区域构造应力场转变的控制。Shao *et al.* (1998)对该地区的基性岩墙群进行了详细的岩石地球化学及年代学研究,而对本区中性岩墙群的特征目前还没有具体报道。笔者在详细的野外考察的基础上,对代表性的样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年和岩石地球化学特征分析,拟通过对该岩墙群的侵位时代、化学组成、构造背景等特征的研究,为华

北东部侏罗纪到白垩纪的区域构造应力场转变的时代、背景和机制提供一定的约束。

1 地质概况和样品特征

研究区位于华北板块与西伯利亚板块的对接活动带上,属巨型中亚造山带的中—东段。中亚造山带是全球显生宙陆壳增生与改造最显著的地区,总体上经历了陆缘增生、后碰撞和陆内造山作用 3 个阶段(Khain *et al.*, 2002)。带内分布有大量的蛇绿岩套、岛弧、增生楔及微地块(Khain *et al.*, 2002, 2003; Xiao *et al.*, 2003),使得该造山带在演化上存在着空间及时间的不均一性。对该造山带的建造及演化历史已有大量研究报道(Tang, 1990; Chen *et al.*, 2000; Badarch *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2003; Jahn *et al.*, 2004; Miao *et al.*, 2008),普遍认为索伦—苏尼特左旗—林西一带为中亚造山带中—东段的最终缝合带(Tang, 1990; Sengör *et al.*, 1993; Xiao *et al.*, 2003),而最终缝合的时间应为晚二叠世—早三叠世(Xiao *et al.*, 2003; Miao *et al.*, 2008; 李益龙等,2008, 2009),该缝合带以西拉木伦断裂带为界与南部的华北板块相隔。

西拉木伦断裂带为一条宽 20 km,长达数千公里的复杂断裂带,其深度达莫霍面,属超岩石圈深断裂带,双井微地块发育在该断裂带内,对断裂带的发生、发展起重要作用(图 1)。双井微地块呈椭圆形东西向展布,由片岩及花岗质片麻岩构成并有后期岩体侵入,其中的片岩组合被称为双井片岩,属变质表壳岩,是前人所划的非正式构造岩片地层单位(内蒙古第二区域地质调查队,1997),花岗质片麻岩于二叠纪中期侵入到双井片岩中(李益龙等,2009),内部常见双井片岩捕虏体,与围岩的接触关系较复杂,可见混合岩化的渐变过渡接触关系(李益龙等,2007, 2008)和界线截然的侵入接触关系。

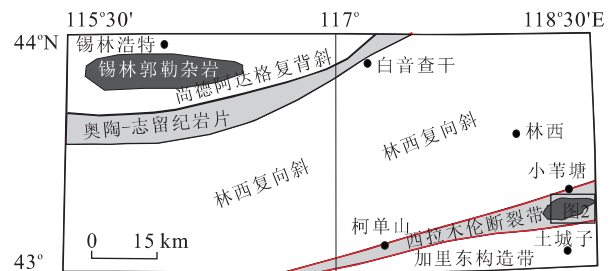


图 1 研究区构造格局略图

Fig. 1 Structure delineation of the research area

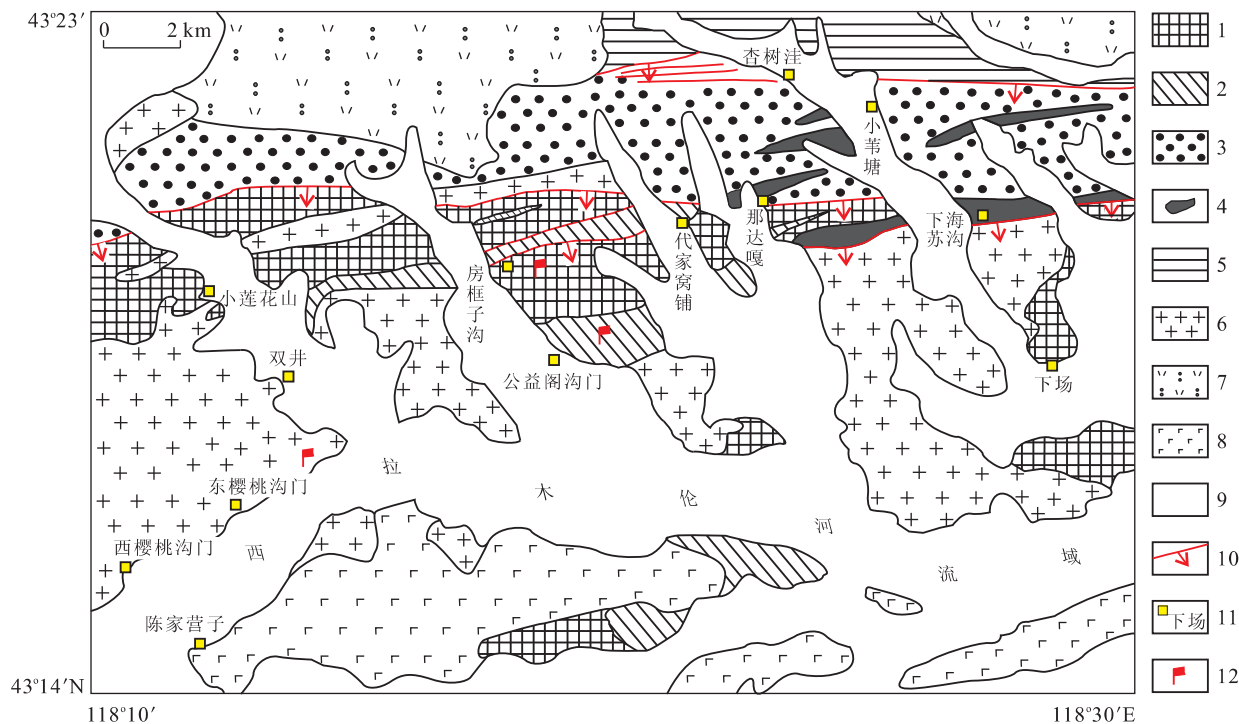


图 2 内蒙古林西县双井地区地质简图

Fig. 2 Geological map of Shuangjing area in Linxi County, Inner-Mongolia

1. 双井片岩; 2. 花岗质片麻岩; 3. 志留系西别河组; 4. 杏树洼蛇绿岩; 5. 二叠系哲斯组; 6. 中生代侵入岩; 7. 中生代火山岩; 8. 第三系玄武岩; 9. 第四系; 10. 断层; 11. 村庄; 12. 岩墙采样点

在双井片岩、花岗质片麻岩及其周围中三叠世的侵入体中均有大量的岩墙侵入(图 2),岩墙走向多为 NE3°~5°,近直立侵入,脉宽十几厘米到几米不等,围岩蚀变不明显.岩石外观新鲜,类型单一,灰绿—灰黑色,致密块状构造.显微镜下观察,岩石为细粒不等粒结构,主要组成矿物为斜长石、碱性长石、普通辉石和不透明物质.斜长石占 40%~50%,自形—半自形长柱状,偶尔可见聚片双晶;碱性长石占 15%~25%,半自形长柱状,可见卡氏双晶,多发生绢云母化、高岭土化;普通辉石占 15%~25%,半自形—他形粒状,多发生钙质交代;石英占 5%±,他形粒状;不透明物质占 5%~10%,多沿空隙充填.矿物普遍蚀变,蚀变矿物为绿泥石、透闪石和方解石等.

2 分析方法

进行锆石分离的岩石样品重约 5 kg,样品采用常规方法进行破碎,经浮选和磁选后,再在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒制成样品靶,锆石样品靶的制备与 SHRIMP 定年锆石样品制备方法基本相同(宋彪等, 2002). 锆石的阴极发光

(CL)显微照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行,测试仪器为装在热场发射环境扫描电子显微镜(Quanta 400 FEG)上的 Gatan 阴极发光仪(MonoCL3+),分析电压为 10 kV,电流为 240 μA.

锆石 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 同位素年龄分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成. 测试仪器为电感耦合等离子体质谱计(Agilent7500a)和准分子激光剥蚀系统(GeoLas2005)联机,激光器为 193 nm ArF 准分子激光器. 激光剥蚀斑束直径为 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. 锆石年龄计算采用国际标准锆石 91500 作为外标(Wiedenbeck *et al.*, 1995),元素含量采用美国国家标准物质局研制的人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标(Pearce *et al.*, 1997),²⁹Si 作为内标元素进行校正. 采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式(peak jumping),每完成 4~5 个测点的样品测定,加测标样一次. 在 15~20 个锆石样品分析点前后各测 2 次 NIST SRM610. 样品的同位素比值和元素含量数据处理采用 GLITTER(ver4. 0, Macquarie University)程序计算,普通 Pb 采用 Andersen 的 3D 坐标法进行校正

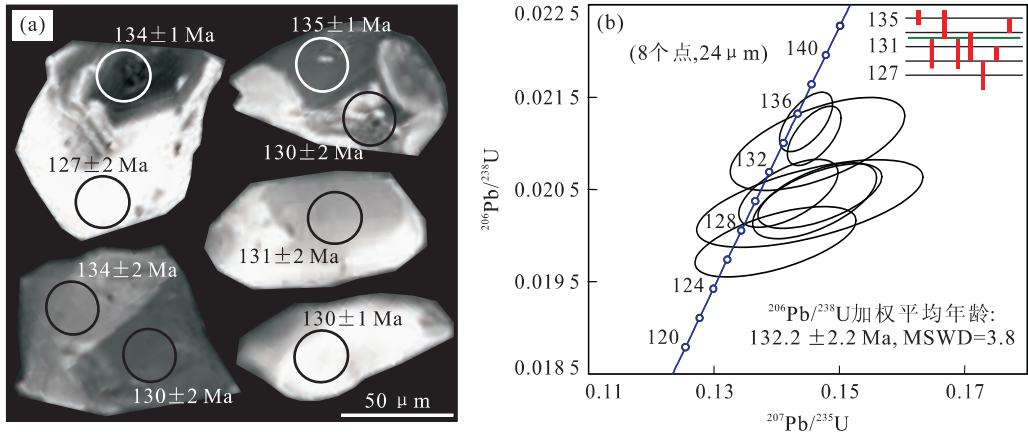


图 3 林西县中性岩墙群单颗粒锆石 CL 图像(a)和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图(b)

Fig. 3 Representative CL images (a) and LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram (b) of zircons from the intermediate dykes in Linxi County
圆圈表示剥蚀激光束对应的位置,直径为 24 μm

表 1 林西县中性岩墙群(8878)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analytic data for intermediate dykes (8878) in Linxi County

| 锆石点号 | | 8878-1 | 8878-2 | 8878-3 | 8878-4 | 8878-5 | 8878-6 | 8878-7 | 8878-8 |
|---------|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 组成 | Pb(10^{-6}) | 18.45 | 3.32 | 2.17 | 6.22 | 6.03 | 6.84 | 12.55 | 17.69 |
| | Th(10^{-6}) | 364.79 | 88.04 | 36.95 | 185.40 | 206.70 | 175.80 | 386.57 | 345.24 |
| | U(10^{-6}) | 628.84 | 110.37 | 73.28 | 181.22 | 203.55 | 215.55 | 411.52 | 629.92 |
| | Th/U | 0.58 | 0.80 | 0.50 | 1.02 | 1.02 | 0.82 | 0.94 | 0.55 |
| 含量比值 | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 0.049 45 | 0.052 01 | 0.050 64 | 0.051 81 | 0.050 33 | 0.050 87 | 0.052 16 | 0.050 25 |
| | 1 σ | 0.000 99 | 0.002 38 | 0.003 23 | 0.004 31 | 0.001 89 | 0.003 14 | 0.002 37 | 0.001 01 |
| | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 0.144 72 | 0.146 15 | 0.146 56 | 0.145 37 | 0.141 99 | 0.139 87 | 0.146 94 | 0.146 06 |
| | 1 σ | 0.002 79 | 0.006 52 | 0.009 16 | 0.011 89 | 0.005 20 | 0.008 46 | 0.006 48 | 0.002 84 |
| | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 0.021 23 | 0.020 38 | 0.020 99 | 0.020 35 | 0.020 46 | 0.019 94 | 0.020 43 | 0.021 08 |
| | 1 σ | 0.000 21 | 0.000 27 | 0.000 33 | 0.000 31 | 0.000 24 | 0.000 25 | 0.000 23 | 0.000 21 |
| | $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ | 0.006 61 | 0.006 65 | 0.006 91 | 0.006 40 | 0.006 20 | 0.006 28 | 0.006 42 | 0.006 68 |
| | 1 σ | 0.000 08 | 0.000 13 | 0.000 23 | 0.000 06 | 0.000 10 | 0.000 06 | 0.000 05 | 0.000 08 |
| 年龄 (Ma) | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 169 | 286 | 224 | 277 | 210 | 235 | 292 | 207 |
| | 1 σ | 27 | 78 | 115 | 190 | 63 | 143 | 106 | 27 |
| | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 137 | 139 | 139 | 138 | 135 | 133 | 139 | 138 |
| | 1 σ | 2 | 6 | 8 | 11 | 5 | 8 | 6 | 3 |
| | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 135 | 130 | 134 | 130 | 131 | 127 | 130 | 134 |
| | 1 σ | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| | $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ | 133 | 134 | 139 | 129 | 125 | 127 | 129 | 135 |
| | 1 σ | 2 | 3 | 5 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |

(Andersen, 2002), 加权平均年龄及谐和图的绘制采用 ISOPLOT(ver3.00)(Ludwig, 1991)完成。

全岩主量元素分析在湖北地质实验研究所武汉综合岩矿测试中心采用 X 射线荧光光谱分析(XRF)。首先将样品粉末熔制成玻璃饼,然后采用 3080E 型 X 射线荧光光谱仪进行主元素测定。该分析法具有制样简单、分析速度快、结果重现性好以及准确度高等优点。FeO 的测定用湿化学法完成。实验获得数据的相对标准偏差小于 5%。微量元素和稀土元素在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资

源国家重点实验室采用 ICP-MS 方法测定,所用仪器为日本 Agilent 公司生产的 Agilent7500a 型等离子体质谱计。

3 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄

由于岩石中锆石不发育,从样品中仅挑选出 5 颗锆石,锆石无色透明,粒柱状,粒度较小,长宽比为 1.2~2.0,长轴为 60~100 μm 。CL 图像显示内部结构均匀,无分带,显示有退变亮边(图 3a)。

表 2 林西县中性岩墙群的主量元素分析结果及处理后数据(%)

Table 2 Compositions of major elements and conversion data of the intermediate dykes from Linxi County

| 样品 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | FeO | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | MnO | P ₂ O ₅ | H ₂ O ⁺ | CO ₂ | Total |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|------------------|------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------|
| 8878-2 | 52.91 | 14.91 | 3.64 | 3.90 | 6.31 | 3.25 | 2.78 | 2.77 | 1.40 | 0.09 | 0.48 | 2.97 | 4.34 | 99.75 |
| 8878-3 | 52.86 | 15.02 | 2.68 | 4.85 | 6.14 | 3.41 | 2.81 | 3.10 | 1.43 | 0.15 | 0.50 | 2.95 | 3.75 | 99.65 |
| 8878-4 | 53.27 | 15.33 | 2.07 | 5.40 | 5.56 | 3.38 | 3.79 | 2.28 | 1.48 | 0.11 | 0.51 | 2.90 | 3.55 | 99.63 |
| 8878-5 | 54.49 | 16.72 | 3.06 | 3.50 | 5.53 | 2.84 | 3.45 | 2.88 | 1.01 | 0.10 | 0.42 | 2.44 | 2.86 | 99.30 |
| 8878-6 | 53.30 | 15.40 | 2.52 | 5.00 | 5.59 | 3.42 | 3.81 | 2.37 | 1.50 | 0.11 | 0.51 | 3.05 | 3.06 | 99.64 |
| 8878-7 | 55.33 | 14.92 | 3.31 | 4.10 | 4.68 | 3.28 | 3.78 | 3.64 | 1.62 | 0.09 | 0.76 | 2.51 | 1.68 | 99.70 |

| 换算后 | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|------------------|------|-------------------------------|------------------|------|-----------------|
| 样品 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | FeO | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | MnO | P ₂ O ₅ | FeO _t | σ | Mg [#] |
| 8878-2 | 57.24 | 16.13 | 3.94 | 4.22 | 6.83 | 3.52 | 3.01 | 3.00 | 1.51 | 0.10 | 0.52 | 7.76 | 2.53 | 44.67 |
| 8878-3 | 56.87 | 16.16 | 2.88 | 5.22 | 6.61 | 3.67 | 3.02 | 3.34 | 1.54 | 0.16 | 0.54 | 7.81 | 2.91 | 45.57 |
| 8878-4 | 57.17 | 16.45 | 2.22 | 5.80 | 5.97 | 3.63 | 4.07 | 2.45 | 1.59 | 0.12 | 0.55 | 7.79 | 2.99 | 45.34 |
| 8878-5 | 57.97 | 17.79 | 3.26 | 3.72 | 5.88 | 3.02 | 3.67 | 3.06 | 1.07 | 0.11 | 0.45 | 6.65 | 3.03 | 44.74 |
| 8878-6 | 56.99 | 16.47 | 2.69 | 5.35 | 5.98 | 3.66 | 4.07 | 2.53 | 1.60 | 0.12 | 0.55 | 7.77 | 3.12 | 45.62 |
| 8878-7 | 57.93 | 15.62 | 3.47 | 4.29 | 4.90 | 3.43 | 3.96 | 3.81 | 1.70 | 0.09 | 0.80 | 7.41 | 4.04 | 45.23 |

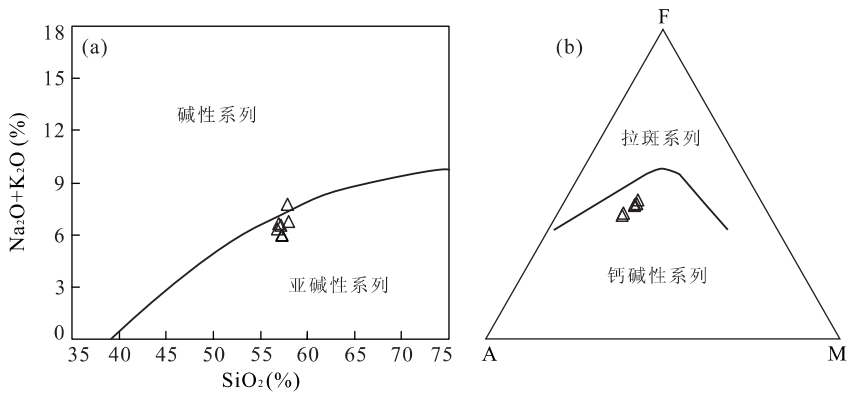


图 4 林西县中性岩墙群的分类图解

Fig. 4 Classification of the intermediate dykes in Linxi County

a. 全碱-SiO₂ 图解(MacDonald and Katsura, 1964); b. AFM 图解(Irvine and Baragar, 1971)

样品的 LA-ICP-MS 锆石分析结果见表 1. 8 个分析点的 Th 含量变化于 $36.95 \times 10^{-6} \sim 386.57 \times 10^{-6}$, U 含量变化于 $73.28 \times 10^{-6} \sim 629.92 \times 10^{-6}$, Th/U 值变化范围为 0.50~1.02, 均大于 0.4, 显示岩浆锆石的特征. 8 个分析点的 U-Pb 分析结果在谐和线上基本集中在一点, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 132.2 ± 2.2 Ma (MSWD=3.8) (图 3b), 表明该岩墙的侵入时代是在早白垩世.

4 岩石化学特征

样品的主量元素测试结果列于表 2. 从表中可见, 样品的 H₂O 和 CO₂ 的质量分数较高, 与样品的蚀变有关, 其中 CO₂ 介于 1.68%~4.34%, 与薄片观察中普遍发育的钙质交代现象一致, 故在实际应用前, 采用 CIPW 标准矿物分子成分对全岩数据进

行了处理.

所测样品的 SiO₂ 含量介于 56.87%~57.97%, 平均为 57.36%, 类似于安山质火山岩类; 除样品 8878-7 中 (Na₂O+K₂O) 为 7.77%, 对应的里特曼指数 σ 为 4.04, 略显碱性岩石的特征外, 其余样品中 (Na₂O+K₂O) 介于 6.01%~6.73%, σ 为 2.53~3.12, 显示亚碱性岩石特征; 样品的 Na₂O/K₂O > 1 (仅 8878-3 中 Na₂O/K₂O = 0.91); CaO 含量较低, 为 4.90%~6.83%, 平均为 6.03%; TiO₂ 含量同样较低, 为 1.07%~1.70%, 平均为 1.50%; Al₂O₃ 含量为 15.62%~17.79%, 镁值 Mg[#] 为 44.67~45.62, 远低于原始地幔值 (68~75), 说明其原始岩浆是经过一定程度结晶分异的产物. 在 (Na₂O+K₂O)-SiO₂ 图上 (图 4a), 样品均落在亚碱性系列区域 (8878-7 略靠近在碱性系列区域). AFM 图解进一步判别结果表明, 样品属于钙碱性系列 (图

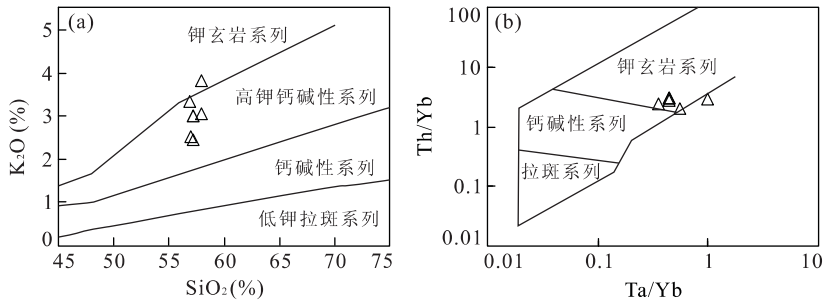


图 5 林西县中性岩墙群的系列判别

Fig. 5 Rock series Discriminant of the intermediate dykes in Linxi County

a. K_2O-SiO_2 图解(Morrison, 1980); b. $Th/Yb-Ta/Yb$ 图解(Müller and Groves, 1995)

4b). 对岩石系列进行进一步判断,在 K_2O-SiO_2 图中样品落在高钾钙碱性系列,但具有向钾玄岩演化的趋势(图 5a),考虑样品的蚀变可能对 K_2O 的影响,选择不活动的微量元素协变关系图进行进一步判断,在 $Th/Yb-Ta/Yb$ 图中,样品落在钾玄岩区域,但在钾玄岩和钙碱性系列的界线附近,同样显示出两者的过渡特征(图 5b). 据相关性图解可以看出, FeO_t 、 MgO 、 Al_2O_3 含量随 SiO_2 含量的增加表现出减少的趋势, (Na_2O+K_2O) 含量则表现出增加的趋势.

样品的微量元素测试结果列于表 3. 岩石中富集大离子亲石元素(LILE) Rb 、 Ba , 贫高场强元素(HFS) Nb 、 Ta 、 Zr 、 Hf 和 Y , 过渡族元素(TE) Cr 、 Ni 含量低,表明有橄榄石和单斜辉石的分离结晶作用发生(张成立等,1999). 将岩石的微量元素含量对原始地幔的相应丰度进行标准化(图 6a),各样品分布曲线协调一致,说明岩浆源区一致. 样品均显示 Nb 、 Ta 的强亏损和 Pb 的强富集,表明岩浆中有地壳物质的加入.

岩石的稀土元素总量很低($35.9 \times 10^{-6} \sim 60.0 \times 10^{-6}$),稀土元素球粒陨石标准化分布模式为右倾型(图 6b),轻重稀土分馏明显,轻稀土强烈富集, $LREE/HREE$ 在 $6.35 \sim 8.21$ 之间, $(La/Yb)_n$ 为 $16.48 \sim 18.65$. 轻稀土分馏显著, $(La/Gd)_n$ 为 $5.42 \sim 7.07$,重稀土弱分馏, $(Dy/Yb)_n$ 为 $1.55 \sim 1.85$. $\delta Eu = 0.88 \sim 1.13$,无明显异常,表明不存在斜长石的分离结晶, $\delta Ce = 0.90 \sim 1.01$,基本不显异常,表明岩浆快速侵位.

综合以上分析可以看出,林西地区出露的中性岩墙群具有高硅($>56\%$)、高铝($>15\%$)和富碱(Na_2O+K_2O 介于 $6.01\% \sim 7.77\%$)的特点,显示高钾钙碱性系列—钾玄岩系列的过渡特征; MgO 和 FeO_t 含量随 SiO_2 升高而降低,说明岩浆经历过一

表 3 林西县中性岩墙群的微量元素分析结果(10^{-6})
Table 3 Compositions of trace elements of the intermediate dykes in Linxi County

| 元素 | 8878-2 | 8878-3 | 8878-4 | 8878-5 | 8878-6 | 8878-7 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Be | 1.68 | 1.95 | 1.63 | 1.35 | 1.64 | 1.86 |
| Sc | 14.80 | 15.20 | 15.00 | 9.28 | 15.30 | 12.70 |
| V | 140.00 | 144.00 | 149.00 | 114.00 | 152.00 | 124.00 |
| Cr | 43.30 | 39.50 | 31.10 | 1.87 | 32.80 | 63.50 |
| Co | 19.90 | 20.90 | 20.60 | 16.00 | 21.00 | 19.90 |
| Ni | 10.60 | 9.92 | 9.13 | 3.51 | 8.97 | 27.00 |
| Cu | 29.40 | 28.40 | 22.50 | 15.40 | 17.60 | 32.80 |
| Zn | 188.00 | 200.00 | 146.00 | 113.00 | 130.00 | 173.00 |
| Ga | 19.70 | 20.00 | 20.20 | 20.70 | 20.90 | 22.40 |
| Rb | 92.70 | 91.50 | 62.20 | 75.10 | 63.40 | 77.10 |
| Sr | 321 | 483 | 646 | 1 048 | 640 | 608 |
| Y | 19.2 | 20.1 | 20.1 | 18.1 | 20.4 | 24.7 |
| Zr | 226 | 236 | 239 | 174 | 247 | 354 |
| Nb | 11.00 | 11.60 | 12.20 | 8.03 | 12.10 | 21.60 |
| Sn | 1.72 | 1.67 | 1.65 | 1.24 | 1.66 | 2.18 |
| Cs | 4.96 | 3.58 | 2.32 | 2.92 | 2.55 | 3.83 |
| Ba | 727 | 1 585 | 1 715 | 4 169 | 1 681 | 1 109 |
| La | 36.1 | 38.7 | 35.6 | 36.1 | 36.7 | 59.7 |
| Ce | 72.3 | 76.8 | 78.0 | 67.8 | 81.8 | 128 |
| Pr | 9.40 | 10.1 | 10.2 | 8.82 | 10.4 | 16.3 |
| Nd | 37.3 | 40.1 | 40.1 | 34.7 | 41.6 | 62.0 |
| Sm | 6.98 | 7.41 | 7.30 | 5.89 | 7.75 | 10.5 |
| Eu | 1.84 | 2.17 | 2.09 | 1.97 | 2.14 | 2.51 |
| Gd | 5.37 | 5.73 | 5.70 | 4.43 | 5.86 | 7.37 |
| Tb | 0.73 | 0.79 | 0.80 | 0.60 | 0.82 | 1.01 |
| Dy | 3.90 | 4.13 | 4.25 | 3.22 | 4.25 | 5.11 |
| Ho | 0.69 | 0.73 | 0.72 | 0.60 | 0.75 | 0.90 |
| Er | 1.83 | 1.90 | 1.96 | 1.58 | 1.95 | 2.33 |
| Tm | 0.25 | 0.28 | 0.27 | 0.22 | 0.27 | 0.32 |
| Yb | 1.46 | 1.58 | 1.54 | 1.39 | 1.60 | 1.96 |
| Lu | 0.23 | 0.25 | 0.24 | 0.21 | 0.25 | 0.28 |
| Hf | 5.38 | 5.77 | 5.73 | 4.16 | 5.92 | 8.15 |
| Ta | 0.65 | 0.70 | 1.51 | 0.50 | 0.71 | 1.08 |
| Pb | 196.00 | 221.00 | 103.00 | 73.30 | 56.80 | 53.40 |
| Th | 4.51 | 4.70 | 4.50 | 3.34 | 4.52 | 3.95 |
| U | 1.25 | 1.22 | 1.13 | 0.85 | 1.13 | 1.26 |
| Eu* | 0.88 | 0.98 | 0.95 | 1.13 | 0.93 | 0.94 |
| Ce* | 0.94 | 0.93 | 0.99 | 0.90 | 1.01 | 1.00 |
| $(La/Yb)_n$ | 17.77 | 17.59 | 16.63 | 18.65 | 16.48 | 16.31 |
| $(La/Gd)_n$ | 5.83 | 5.86 | 5.42 | 7.07 | 5.42 | 5.55 |
| $(Dy/Yb)_n$ | 1.79 | 1.75 | 1.85 | 1.55 | 1.78 | 1.77 |

定程度的分离结晶作用. 大离子亲石元素富集和 Nb 、 Ta 的亏损使得本区岩墙表现出岛弧环境火山

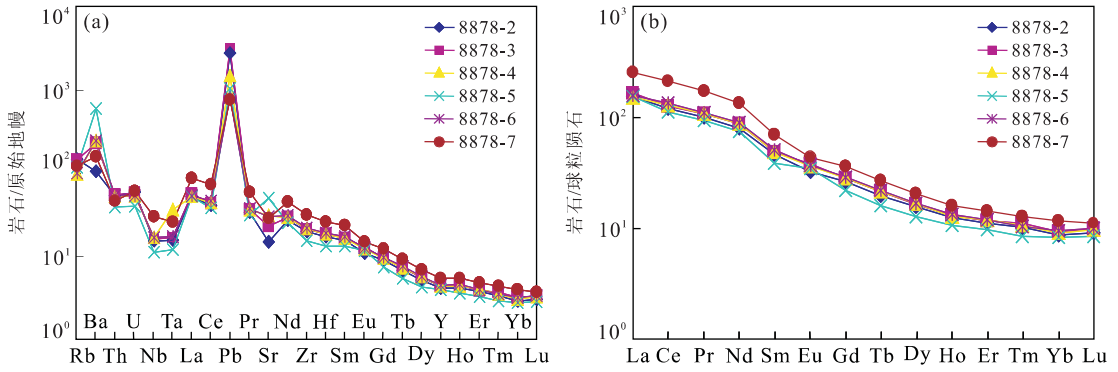


图 6 林西县中性岩墙群微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化分布模式(b)

Fig. 6 Primitive-mantle normalized trace elements distribution patterns (a) and Chondrite normalized REE distribution patterns (b) of the intermediate dykes in Linxi County

标准值采用 Sun and McDonough (1989) 推荐值

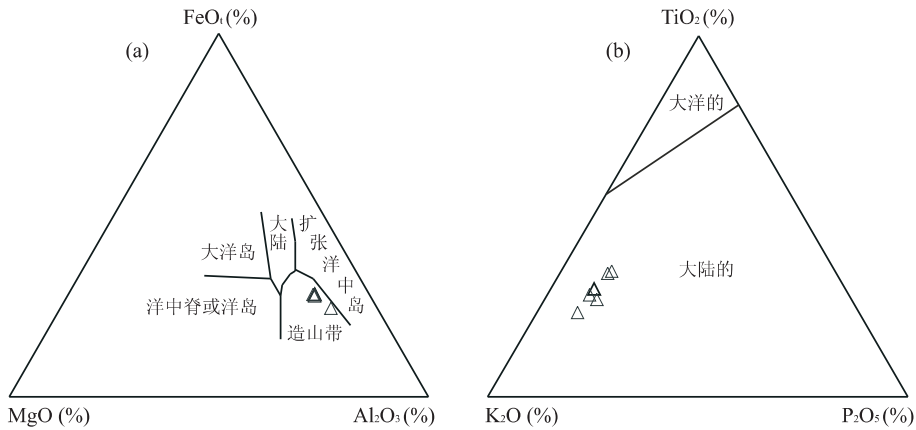


图 7 林西县中性岩墙群的构造背景判别图

Fig. 7 Tectonic discriminant diagrams for intermediate dykes in Linxi County

a. FeO_t - MgO - Al_2O_3 图解(Pearce *et al.*, 1977); b. TiO_2 - K_2O - P_2O_5 图解(Pearce *et al.*, 1975)

岩的特征. 利用全岩主量元素对岩石的构造环境进行初步判别, 据 FeO_t - MgO - Al_2O_3 图解(图 7a)和 TiO_2 - K_2O - P_2O_5 图解(图 7b)可以看出, 此次岩浆活动属于陆内岩浆作用的产物, 岩浆显示了该地区晚古生代以来造山带的信息, 其源区可能有俯冲地壳物质的加入.

5 讨论

5.1 岩石地球化学成因背景

本文所研究的中性岩墙群与张玉涛等(2006)报道的大兴安岭北部内蒙古扎兰屯东侧的中性岩墙群具有相似的岩石地球化学特征, 均显示岛弧火山岩的特征. 张玉涛等(2006)基于 Sr-Nd 和 Pb 同位素的研究, 认为岩浆来源于受到俯冲洋壳改造的岩石圈地幔, 使其显示岛弧火山岩的特征, 其锆石

LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 120.6 ± 4.7 Ma, 基质 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 坪年龄为 122.2 ± 0.6 Ma, 稍晚于本文的样品, 但同样侵位于早白垩世. 考虑 Ta/Hf 和 Th/Hf 比值在地幔部分熔融过程中只有很小的变化, 在岩浆分离结晶过程中基本不变, 可以认为 Ta/Hf 和 Th/Hf 比值的差异是源区成份的不同所引起的(McCulloch and Gamble, 1989). 林西县中性岩墙群样品的 Ta/Hf 介于 0.12~0.26、Th/Ta 介于 2.97~6.93, 参照大陆板内玄武岩的 Ta/Hf > 0.1, Th/Ta > 1.6 的判别标志(汪云亮等, 2001), 该岩墙群应形成于大陆板内环境, 与前面采用主量元素判断的结果(图 7)一致. 同时, 样品轻稀土富集, 无明显 Eu 异常, 也说明岩石不是来自幔源玄武岩浆在基性斜长石分异之后的残余熔体, 而是来源于壳幔混源型岩浆(吴利仁, 1985; 邵济安等, 2001a).

Shao *et al.* (1998) 对研究区的辉绿岩墙群研究

表明:该基性岩墙群均为上地幔来源的大陆拉斑玄武岩,未受到明显的地壳混染。而本文报道的中性岩墙群显示高钾钙碱性系列—钾玄岩系列的过渡特征,来源于壳幔混源型岩浆,表明中生代在林西地区存在长期而强烈的地幔岩浆底侵作用,促使幔源玄武质岩浆直接添加到下地壳底部,形成了壳幔混熔的岩浆房。由于研究区位于古亚洲构造域的范围,加里东期曾是古蒙古洋的一部分,古蒙古洋的闭合使得该地区岩石圈内保留有俯冲的洋壳,本文研究的中性岩墙群之所以显示些许岛弧火山岩的特征,就是由于这些俯冲洋壳加入了该地区的下地壳。

5.2 区域岩墙群时空特征对比

研究区位于西拉木伦构造带内,已有资料证明,西拉木伦—长春缝合带最终闭合的时间是晚二叠世—早三叠世(孙德有等,2004;尚庆华,2004,李朋武等,2006;李益龙等,2008,2009)。到了中生代,该缝合带由挤压机制逐渐向板内张性机制转变,该时期华北东部地区在拉张机制下存在普遍发育的岩浆活动(吴福元等,1999;洪大卫等,2000;邵济安等,2001b;张玉涛等,2006)。周新华(2006,2009)对历年来关于华北岩石圈中生代岩浆活动时序的研究成果进行了总结,指出该构造机制转变的起始时段为140~160 Ma,峰值时段为120 Ma。本文得到的中性岩墙群的侵位时代(132.2 ± 2.2 Ma)明显处于该时期。目前,对于该地区中生代火山岩形成于板内伸展构造环境这一认识已基本趋于一致,本文得到的岩墙群的岩石化学特征也再次证实了这一点。

Shao *et al.* (1998)将林西地区分布的辉绿岩岩墙群分为三类,形成时代分别为早侏罗世(199 Ma)、中侏罗世(170 Ma)和早白垩世(100 Ma),反映了林西地区中生代挤压与拉张多次交替出现的构造体制,3个时期岩墙走向依次为 $NW330^\circ-NW350^\circ-NE20^\circ$ 。本文研究的中性岩墙群属高钾钙碱性系列,走向为 $NE3^\circ-5^\circ$,明显介于Shao *et al.* (1998)报道的第二期和第三期岩墙群之间;侵位时代为 132.2 ± 2.2 Ma,同样介于第二期和第三期岩墙群的时代之间,表明岩墙的产状从早侏罗世—早白垩世逐渐发生顺时针旋转,研究区长期的左旋剪切机制是可能存在的。

5.3 区域地球动力学背景

通过以上研究我们认为林西地区普遍发育的中性岩墙群是软流圈岩浆长期底侵作用的结果。该地区从早侏罗世开始存在着挤压机制与拉张机制的多次转换,自160~100 Ma才总体处于伸展构造环境

下。早期构造机制的交替转换表明该时期控制研究区构造格局的动力机制不止有一种,而应是两种或多种动力机制共同作用的结果。

关于中国东部岩石圈减薄的地球动力学背景已有大量论述(吴福元等,2003;徐义刚,2006;邓晋福等,2006),普遍认为岩石圈的减薄与东侧太平洋板块的俯冲有关,即大洋板块的俯冲作用导致岩石圈加厚,进而发生岩石圈拆沉。全球地震层析揭示在中国东部大陆下的地幔过渡带内有一水平分布的高速体,代表了俯冲的太平洋板块(Fukao *et al.*, 1992; Zhao, 2004),证实华北东部岩石圈的减薄可能与太平洋板块俯冲引起的地幔对流的加强有关。研究区长期存在的大规模的左旋剪切机制很可能主要受控于太平洋板块向亚洲板块的斜向俯冲,而早期可能还受到华南板块与华北板块碰撞的影响(Xu, 2001)。

6 结论

(1)内蒙古林西县西拉木伦断裂带内的中性岩墙群侵位于早白垩世,其锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 132.2 ± 2.2 Ma;(2)该岩墙群具有高钾钙碱性系列—钾玄岩系列的过渡特征,岩浆源区具有壳幔混源的特征,是早期俯冲洋壳遭受幔源岩浆底侵作用的结果;(3)岩石形成于板内伸展环境下,其产状受到研究区长期的左旋剪切机制的控制,该机制可能主要与太平洋板块相对亚洲板块的向北运动有关。

致谢:锆石的阴极发光显微照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,实验过程中得到了弓虎军博士的大力帮助与关心,野外工作中得到了中国地质大学(武汉)杨巍然教授和赵温霞教授的悉心指导,在此一并表示衷心的感谢!

References

- Andersen, T., 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79. doi:10.1016/S0009-2541(02)00195-X
- Badarch, G., Cuningham, W. D., Windley, B. F., 2002. A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(1): 87-110. doi:10.1016/S1367-9120(02)00017-2
- Chen, B., Jahn, B. M., Wilde, S., et al., 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications. *Tec-*

- tonophysics, 328 (1—2): 157—182. doi: 10. 1016/S0040—1951(00)00182—7
- Deng, J. F., Su, S. G., Liu, C., et al., 2006. Discussion on the lithospheric thinning of the North China craton: delamination? or thermal erosion and chemical metasomatism? *Earth Science Frontiers*, 13(2): 105—119 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J. F., Zhao, H. L., Mo, X. X., et al., 1996. Continental roots-plume tectonics of China: key to the continental dynamics. Geological Publishing House, Beijing, 30—39 (in Chinese).
- Fukao, Y., Obayashi, M., Inoue, H., et al., 1992. Subducting slabs stagnant in the mantle transition zone. *Journal of Geophysical Research*, 97: 4809—4822. doi: 10. 1029/91JB02749
- Halls, H. C., 1982. The importance and potential of mafic dyke swarms in studies of geodynamic processes. *Geosciences Canada*, 9: 145—154.
- Hong, D. W., Wang, S. G., Xie, X. L., et al., 2000. Genesis of positive $\epsilon_{Nd}(t)$ granitoids in the Da Hinggan MTS—Mongolia orogenic belt and continental crustal growth. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441—456 (in Chinese with English abstract).
- Hu, S. X., Zhao, Y. Y., Hu, Z. H., et al., 1994. Evolution and development of tectonics and magmatism at the active continental margin of the East China ($E 106^\circ$) during Mesozoic and Cenozoic. *Acta Petrologica Sinica*, 10(4): 370—381 (in Chinese with English abstract).
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523—548.
- Jahn, B. M., Capdevila, R., Liu, D., et al., 2004. Sources of Phanerozoic granitoids in the transect Bayanhongor—Ulaan Baatar, Mongolia: geochemical and Nd isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 629—653. doi: 10. 1016/S1367—9120(03)00125—1
- Khain, E. V., Bibikova, E. V., Kröner, A., et al., 2002. The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt: U-Pb and Pb-Pb zircon ages for the Dunzhugur complex, eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 199(3—4): 311—325. doi: 10. 1016/S0012—821X(02)00587—3
- Khain, E. V., Bibikova, E. V., Salnikova, E. B., et al., 2003. The Palaeo-Asian ocean in the Neoproterozoic and Early Palaeozoic: new geochronologic data and palaeotectonic reconstructions. *Precambrian Research*, 122(1—4): 329—358. doi: 10. 1016/S0301—9268(02)00218—8
- Li, P. W., Gao, R., Guan, Y., et al., 2006. Palaeomagnetic constraints on the final closure time of Solonker-Linxi suture. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36(5): 744—758 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L., Zhou, H. W., Ge, M. C., et al., 2007. Characteristics and genesis of migmatites within the northern of Shuangjing micro-plate in the West Lamulun fault zone, Inner Mongolia. *J. Mineral. Petrol.*, 27(4): 22—29 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L., Zhou, H. W., Ge, M. C., et al., 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of migmatite from north of Shuangjing schist in Linxi, Inner Mongolia. *J. Mineral. Petrol.*, 28(2): 10—16 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L., Zhou, H. W., Zhong, Z. Q., et al., 2009. Collision processes of North China and Siberian Plates: evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb age on deformed granite in Xar Moron suture zone. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(6): 931—938 (in Chinese with English abstract).
- Lu, F. X., Sang, L. K., 2002. Petrology. Geological Publishing House, Beijing, 42—45 (in Chinese).
- Ludwig, K. R., 1991. Isoplot—a plotting and regression program for radiogenic-isotope data. *US Geological Survey Open-File Report*, 39: 91—445.
- Ma, Z. J., Wang, G. Q., 1999. Strip-shaped tectonic division of contemporary lithospheric structure of eastern China. *Geological Journal of China Universities*, 5(1): 7—16 (in Chinese with English abstract).
- MacDonald, G. A., Katsura, T., 1964. Chemical composition of Hawaiian lavas. *Journal of Petrology*, 5(1): 82—133. doi: 10. 1093/petrology/5. 1. 82
- McCulloch, M. T., Gamble, J. A., 1989. Depleted source for volcanic arc basalts: constraints from basalts of Kermadec-Taupo volcanic zone based on trace elements, isotopes and subduction chemical geodynamica. In: Continental magmatism, Inter. Volcanic. Conf. Abstr., New Mexico Bur. *Miner. Resour. Bull.*, 131—180.
- Miao, L. C., Fan, W. M., Liu, D. Y., et al., 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolite 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. jseas. 2007. 11. 005
- Morrison, G. W., 1980. Characteristics and tectonic setting of shoshonite rock association. *Lithos*, 13(1): 97—108. doi: 10. 1016/0024—4937(80)90067—5

- Müller, D., Groves, D. I., 1995. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization, Springer Verlag, Berlin, 1—144.
- Pearce, J. A., Gorman, B. E., Birkett, T. C., 1975. The TiO_2 - K_2O - P_2O_5 diagram, a method of discrimination between ocean and non-ocean basalts, *Earth and Planetary Science Letters*, 24: 419—426.
- Pearce, N. J. G., Perkins, W. T., Westgate, J. A., et al., 1997. A compilation of new and published major and trace element data for NIST SRM 610 and NIST SRM 612 glass reference materials, *Geostandard and Geoanalytical Research*, 21(1): 115—144. doi: 10. 1111/j. 1751—908X. 1997. tb00538. x
- Pearce, T. H., Gorman, B. E., Birkett, T. C., 1977. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks, *Earth and Planetary Science Letters*, 36(1): 121—132. doi: 10. 1016/0012—821X(77)90193—5
- Ren, J. S., Niu, B. G., He, Z. J., et al., 1997. Tectonic framework and geodynamic evolution of eastern China, *Geological Research*, 29(30): 43—55 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. S., Wang, Z. X., Chen, B. W., et al., 1999. The tectonics of China from a global view—a guide to the tectonic map of China and adjacent regions. Geological Publishing House, Beijing, 32—33 (in Chinese).
- Sengör, 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: 299—307. doi: 10. 1038/364299a0
- Shang, Q. H., 2004. Occurrences of Permian radiolarians in central and eastern Nei Mongol (Inner Mongolia) and their geological significance to the northern China orogen, *Chinese Science Bulletin*, 49(24): 2613—2619. doi: 10. 1360/04wd0069
- Shao, J. A., Gai, F. Y., Zhang, L. Q., 1998. Coupling of mantle-upwelling and shearing-Mesozoic dyke-swarms in Da-Hinggan mountains, Northeast China, *Episodes*, 21: 99—103.
- Shao, J. A., Liu, F. T., Chen, H., 2001a. Relationship between Mesozoic magmatism and subduction in Da Hinggan-Yanshan area, *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 56—63 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Zhang, L. Q., 2002. Mesozoic dyke swarms in the north of North China, *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 312—318 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Zhang, L. Q., Wei, C. J., et al., 2001b. Composition and features of the Mesozoic bimodal dike swarm in Nankou area, Beijing, *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 205—212 (in Chinese with English abstract).
- Song, B., Zhang, Y. H., Wan, Y. S., et al., 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating, *Geological Review*, 48(Suppl.): 26—30 (in Chinese with English abstract).
- Sun, D. Y., Wu, F. Y., Zhang, Y. B., et al., 2004. The final closing time of the west Lamulun River-Changchun-Yanji plate suture zone—evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province, *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(2): 174—181 (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. In: Saundern, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the ocean basins, Geological Society of London, Special Publications*, 42: 313—345. doi: 10. 1144/GSL. SP. 1989. 042. 01. 19
- Tang, K. D., 1990. Tectonic development of Paleozoic fold-belts at the north margin of the Sino-Korean craton, *Tectonics*, 9: 249—260.
- The Second Regional Geological Survey Team of Inner Mongolia Autonomous Region, 1997. 1: 50 000 regional geological surveys report on Shuangjing region (in Chinese).
- Wang, Y. L., Zhang, C. J., Xiu, S. Z., 2001. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts, *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 413—421 (in Chinese with English abstract).
- Wiedenbeck, M., Alle, P., Corfu, F., et al., 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses, *Geostand. Newsl.*, 19(1): 1—23. doi: 10. 1111/j. 1751—908X. 1995. tb00147. x
- Wu, F. Y., Ge, W. C., Sun, D. Y., et al., 2003. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China, *Earth Science Frontiers*, 10(3): 51—60 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Lin, Q., et al., 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China, *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181—189 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. Y., 2002. The Yanshanian orogeny and Late Mesozoic activation in China continent, *Chinese Journal of Geology*, 37(4): 453—461 (in Chinese with English abstract).
- Wu, L. R., 1985. Mesozoic granitoids in East China, *Acta Petrologica Sinica*, 1(1): 1—9 (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: 1484—1505. doi: 10.1029/2002TC001484.
- Xu, Y. G., 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: evidence, timing and mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9—10): 747—757. doi: 10.1016/S1464—1895(01)00124—7
- Xu, Y. G., 2006. Using basalts geochemistry to constrain Mesozoic-Cenozoic evolution of the lithosphere beneath North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 93—104 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Meng, Q. R., Liu, J. M., et al., 2004. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China and implication for geodynamics. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 285—297 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Yang, J. H., Liu, W. J., 2001. Large clusters of gold deposits and large-scale metallogenesis in the Jiaodong Peninsula, eastern China. *Science in China (Series D)*, 44(8): 758—768. doi: 10.1007/BF02907205
- Zhai, M. G., Zhu, R. X., Liu, J. M., et al., 2004. Time range of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China block. *Science in China (Series D)*, 47(2): 151—159. doi: 10.1360/02ydo416
- Zhang, C. L., Zhou, D. W., Jin, H. L., et al., 1999. Study on the Sr, Nd, Pb and O isotopes of basic dyke swarms in the Wudang block and basic volcanics of the Yaolinghe Group. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 430—437 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. R., 1998. Yanshan event. *Acta Geologica Sinica*, 72(2): 103—111 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. T., Zhang, L. C., Ying, J. F., et al., 2006. Geochemistry of Zhalantun dyke swarm in North Da Hinggan mountain and its geological implication. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2733—2742 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, D. P., 2004. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 146(1—2): 3—34. doi: 10.1016/j.pepi.2003.07.032
- Zhao, Y., 1990. The Mesozoic orogenies and tectonic evolution of the Yanshan area. *Geological Review*, 36(1): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., et al., 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: significance for lithosphere evolution. *Lithos*, 57(1): 43—66. doi: 10.1016/S0024—4937(00)00073—6
- Zheng, Y. D., Davis, G. A., Wang, C., et al., 2000. Major Mesozoic tectonic events in the Yanshan belt and the plate tectonic setting. *Acta Geologica Sinica*, 74(4): 289—302 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. H., 2006. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath eastern China in the Cenozoic-Mesozoic: review and prospect. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 50—64 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. H., 2009. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath North China in Cenozoic-Mesozoic: revisited. *Geological Journal of China Universities*, 15(1): 1—18 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 等, 2006. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论: 是拆沉, 还是热侵蚀和化学交代? 地质前缘, 13(2): 105—119.
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等, 1996. 中国大陆根—柱构造: 大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 30—39.
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 等, 2000. 兴蒙造山带正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. 地质前缘, 7(2): 441—456.
- 胡受奚, 赵乙英, 胡志宏, 等, 1994. 中国东部中—新生代活动大陆边缘构造——岩浆作用演化和发展. 岩石学报, 10(4): 370—381.
- 李朋武, 高锐, 管焯, 等, 2006. 内蒙古中部索伦—林西缝合带封闭时代的古地磁分析. 吉林大学学报(地球科学版), 36(5): 744—758.
- 李益龙, 周汉文, 葛梦春, 等, 2007. 西拉木伦断裂带双井微地块北缘混合岩的基本特征及其成因机制讨论. 矿物岩石, 27(4): 22—29.
- 李益龙, 周汉文, 葛梦春, 等, 2008. 内蒙古林西县双井片岩北缘混合岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄. 矿物岩石, 28(2): 10—16.
- 李益龙, 周汉文, 钟增球, 等, 2009. 华北与西伯利亚板块的对接过程: 来自西拉木伦缝合带变形花岗岩锆石的 LA-ICPMS U-Pb 年龄证据. 地球科学——中国地质大学学报, 34(6): 931—938.
- 路凤香, 桑隆康, 2002. 岩石学. 北京: 地质出版社, 42—45.
- 马宗晋, 王国权, 1999. 中国大陆东部现今岩石圈结构的板条构造分区. 高校地质学报, 5(1): 7—16.
- 内蒙古第二区域地质调查队, 1997. 双井地区 1: 5 万区域地质调查报告.
- 任纪舜, 牛宝贵, 和政军, 等, 1997. 中国东部的构造格局和动力学演化. 地质研究, 29(30): 43—55.

- 任纪舜,王作勋,陈炳蔚,等,1999. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明. 北京:地质出版社,32—33.
- 尚庆华,2004. 北方造山带内蒙古中、东部地区二叠纪放射虫的发现及意义. 科学通报,49(24): 2574—2579.
- 邵济安,刘福田,陈辉,等,2001a. 大兴安岭—燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系. 地质学报,75(1): 56—63.
- 邵济安,张履桥,2002. 华北北部中生代岩墙群. 岩石学报,18(3): 312—318.
- 邵济安,张履桥,魏春景,等,2001b. 北京南口中生代双峰式岩墙群的组成及其特征. 地质学报,75(2): 205—212.
- 宋彪,张玉海,万渝生,等,2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评,48(增刊): 26—30.
- 孙德有,吴福元,张艳斌,等,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.
- 汪云亮,张成江,修淑芝,2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别. 岩石学报,17(3): 413—421.
- 吴福元,葛文春,孙德有,等,2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘,10(3): 51—60.
- 吴福元,孙德有,林强,等,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.
- 吴根耀,2002. 燕山运动和中国大陆晚中生代的活化. 地质科学,37(4): 453—461.
- 吴利仁,1985. 中国东部中生代花岗岩类. 岩石学报,1(1): 1—9.
- 徐义刚,2006. 用玄武岩组成反演中—新生代华北岩石圈的演化. 地学前缘,13(2): 93—104.
- 翟明国,孟庆任,刘建明,等,2004. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨. 地学前缘,11(3): 285—297.
- 翟明国,杨进辉,刘文军,2001. 胶东大型黄金矿集区及大规模成矿作用. 中国科学(D辑),31(7): 545—552.
- 翟明国,朱日祥,刘建明,等,2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. 中国科学(D辑),33(10): 913—920.
- 张成立,周鼎武,金海龙,等,1999. 武当地块基性岩墙群及耀岭河群基性火山岩的 Sr、Nd、Pb、O 同位素研究. 岩石学报,15(3): 430—437.
- 张宏仁,1998. 燕山事件. 地质学报,72(2): 103—111.
- 张玉涛,张连昌,英基丰,等,2006. 大兴安岭北部扎兰屯脉岩群的地球化学特征及其地质意义. 岩石学报,22(11): 2733—2742.
- 赵越,1990. 燕山地区中生代造山运动及构造演化. 地质论评,36(1): 1—13.
- 郑亚东,Davis,G. A.,王琮,等,2000. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题. 地质学报,74(4): 289—302.
- 周新华,2006. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题. 地学前缘,13(2): 50—64.
- 周新华,2009. 华北中—新生代大陆岩石圈转型的研究现状与方向——兼评“岩石圈减薄”和“克拉通破坏”. 高校地质学报,15(1): 1—18.