

doi:10.3799/dqkx.2012.00

古亚洲构造域和西太平洋构造域在索伦缝合带东段的叠加:来自内蒙古林西县西拉木伦断裂带内变形闪长岩的岩石学、地球化学和年代学证据

李益龙^{1,2},周汉文^{1,2*},肖文交³,钟增球^{1,2},尹淑萍⁴,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. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化重点实验室,北京 100029

4. 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岩株状产出并具有不同程度变形特征的闪长岩体,岩体侵入到双井片岩中。对该闪长岩进行了岩石学、地球化学、锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄和角闪石⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄的研究。结果表明内蒙古林西县西拉木伦断裂带内的变形闪长岩侵位于早二叠世,其锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 286±1 Ma。岩浆来源于俯冲带流体/熔体交代作用而形成的富集地幔。岩石遭受了早侏罗世绿帘角闪岩相变质作用,角闪石⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄为 188.7±1.4 Ma。结合研究区及邻区近年来的新成果认为索伦缝合带早古生代以来的镁铁质岩石均显示来源于相对富集 LILE、LREE 的地幔,与俯冲流体或熔体的改造作用相关,并且随着时代的更新改造程度显示增强的趋势。索伦缝合带在晚石炭世(~310 Ma)之前发生过闭合碰撞,晚石炭世—早二叠世(~310~276 Ma)处于后造山伸展的背景,在伸展环境下形成了华北北缘该时期广泛分布的闪长岩—花岗闪长岩带,报道的闪长岩即为该时期的产物。晚二叠世缝合带局部区域存在洋盆,洋盆的闭合导致了晚二叠世—中三叠世(~272~230 Ma)索伦缝合带的最终碰撞缝合,最终碰撞缝合在空间上的不均一性形成了缝合带内该时期大量并存的同碰撞花岗岩和后碰撞花岗岩。索伦缝合带的缝合导致华北板块与其北部各微陆块的拼合,此时蒙古—鄂霍次克海作为古太平洋的一个分支北东向展布于西伯利亚板块和拼合后的华北板块之间。早侏罗世蒙古—鄂霍次克海在蒙古东北部发生闭合,本文报道的角闪石⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄记录了洋壳闭合后陆—陆碰撞的变质时间,之后研究区进入后造山伸展的环境。此时在古太平洋板块向华北板块俯冲应力的共同作用下,华北东部在侏罗纪出现挤压机制与拉张机制的多次转换。晚侏罗世古太平洋板块俯冲方向转变后,中国东部进入持续的拉张背景,并转入西太平洋构造域的范畴。

关键词:古亚洲构造域;太平洋构造域;索伦缝合带;西拉木伦断裂带;闪长岩;内蒙古。

中图分类号: P583

文章编号: 1000-2383(2012)03-0000-18

收稿日期: 2011-09-23

Superposition of Paleo-Asian and West-Pacific Tectonic Domains in the Eastern Section of the Solonker Suture Zone: Insights from Petrology, Geochemistry and Geochronology of Deformed Diorite in Xar Moron Fault Zone, Inner Mongolia

LI Yi-long^{1,2}, ZHOU Han-wen^{1,2*}, XIAO Wen-jiao³, ZHONG Zeng-qiu^{1,2}, YIN Shu-ping⁴, LI Fu-lin¹

1. Faculty of Earth Science, 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. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

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

Abstract: Some diorite stocks developed in the Xar Moron fault belt in Linxi County, Inner Mongolia. They intruded into the

基金项目:国家973项目(No. 2007CB411307);国家自然科学基金项目(No. 40725009);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。*通讯作者:周汉文,E-mail: hwzhou@cug.edu.cn

Shuangjing Schist and display variable degrees of deformation. This study presents the petrology, geochemistry, a LA-ICPMS U-Pb zircon age and a hornblende ^{40}Ar - ^{39}Ar age of the diorite. The diorite was emplaced in the Early Permian, as reflected by a LA-ICPMS U-Pb zircon age of 286 ± 1 Ma. The magma is derived from enriched mantle metasomatized by slab-derived fluids or melts. The diorites were subject to epidote-amphibolite facies metamorphism during the Early Jurassic, resulting in a hornblende ^{40}Ar - ^{39}Ar age of 188.7 ± 1.4 Ma. Combining the new data with the latest published results from the study area and the region, we conclude that the Early Paleozoic and younger mafic rocks in the Solonker suture zone are derived from mantle that was metasomatized by subducted sediments, and that metasomatism increased with time. A stage of collision occurred before the Late Carboniferous (~ 310 Ma) and the Solonker suture zone underwent post-orogenic extension during the Late Carboniferous to Early Permian (~ 310 to 276 Ma). The diorite studied is part of a widespread diorite-granodiorite suite that formed during this period of extension in the suture zone. In the Late Permian oceanic basins occurred locally in the suture zone. The closure of these basins induced the final collision of the Solonker suture during the Late Permian to Middle Triassic (~ 272 to 230 Ma). Spatial variation in the timing of final collision led to the coeval formation of syn-collisional and post-collisional granites in the suture zone. Closure of the Solonker suture zone resulted in the amalgamation of the North China Craton with some microcontinents to its north. North of the accreted microcontinents, the Mongol-Okhotsk Ocean, a branch of the Paleo-Pacific Ocean, formed the remaining NE-striking oceanic domain between the Siberia Craton to the north and the North China Craton to the south. The closure of the Mongol-Okhotsk Ocean in NE Mongolia in the Early Jurassic induced the continent-continent collision recorded by the hornblende ^{40}Ar - ^{39}Ar age from the Solonker diorite. The research area then entered post-orogenic extension, while further east the Paleo-Pacific plate subducted beneath the North China Craton. The combination of regional post-orogenic extension and distant subduction led to alternating compression and extension in the Jurassic in what is now northeastern China. After the change in the subduction direction of the Paleo-Pacific plate in the Late Jurassic, the tectonic environment in northeastern China finally became extensional and the region entered the West-Pacific tectonic domain.

Key words: Paleo-Asian orogenic region; West-Pacific orogenic region; Solonker suture zone; Xar Moron fault zone; diorite; Inner-Mongolia.

中亚造山带是全球显生宙陆壳增生与改造最显著的地区之一,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, 2009, 2010; Jahn *et al.*, 2004; Miao *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2011),普遍认为索伦—苏尼特左旗—林西一带(以下简称索伦缝合带)为中亚造山带东段的最终缝合带(图1)(Tang, 1990; Sengör *et al.*, 1993; Xiao *et al.*, 2003),但对最终缝合的时间还有不同认识。

中亚造山带的形成与古亚洲洋的演化密切相关(Tang, 1990; Sengör *et al.*, 1993). Windley *et al.*(2007)认为古亚洲洋的演化格局与西太平洋中生代—新生代演化具有对比性:多期次的大洋板片俯冲产生了大量的俯冲增生杂岩,以及夹杂其中的微地块、海底高原和洋岛等构造单元,构成了目前复杂的构造格局。索伦缝合带记录了古亚洲洋闭合的构造演化过程,涉及加里东期和海西期多期造山作用和

岛弧增生作用。进入中生代,在太平洋板块向欧亚大陆俯冲的动力体系作用下,该缝合带又经受了强烈的改造(李益龙等,2010)。

在内蒙古林西县西拉木伦断裂带内发育大规模的酸性—基性侵位体,该断裂带是索伦缝合带的一部分。断裂带中的房框子单元S型花岗岩锆石LA-ICPMS U-Pb年龄 271.9 ± 1.6 Ma、 264.8 ± 1.8 Ma(李益龙等,2009)和侵位于房框子单元南部的双井子单元S型花岗岩锆石SHRIMP U-Pb年龄 229.2 ± 4.1 Ma、 237.5 ± 2.7 Ma(李锦铁等,2007)指示西拉木伦断裂带在 $\sim 270\sim 230$ Ma的碰撞造山背景,预示索伦缝合带的最终缝合发生在晚二叠世—早三叠世。房框子单元花岗岩侵位于双井片岩南缘(图2),该片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. 双井地区1:5万区域地质调查报告。)。对侵位于双井片岩和酸性侵位体中的中性岩墙群的锆石LA-ICPMS U-Pb定年和岩石地球化学特征研究表明,岩墙群侵位于 132.2 ± 2.2 Ma,形成于板内拉张的环境,岩浆源区具有壳幔混源的特征,是早期俯冲洋壳改造幔源岩浆的结果,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

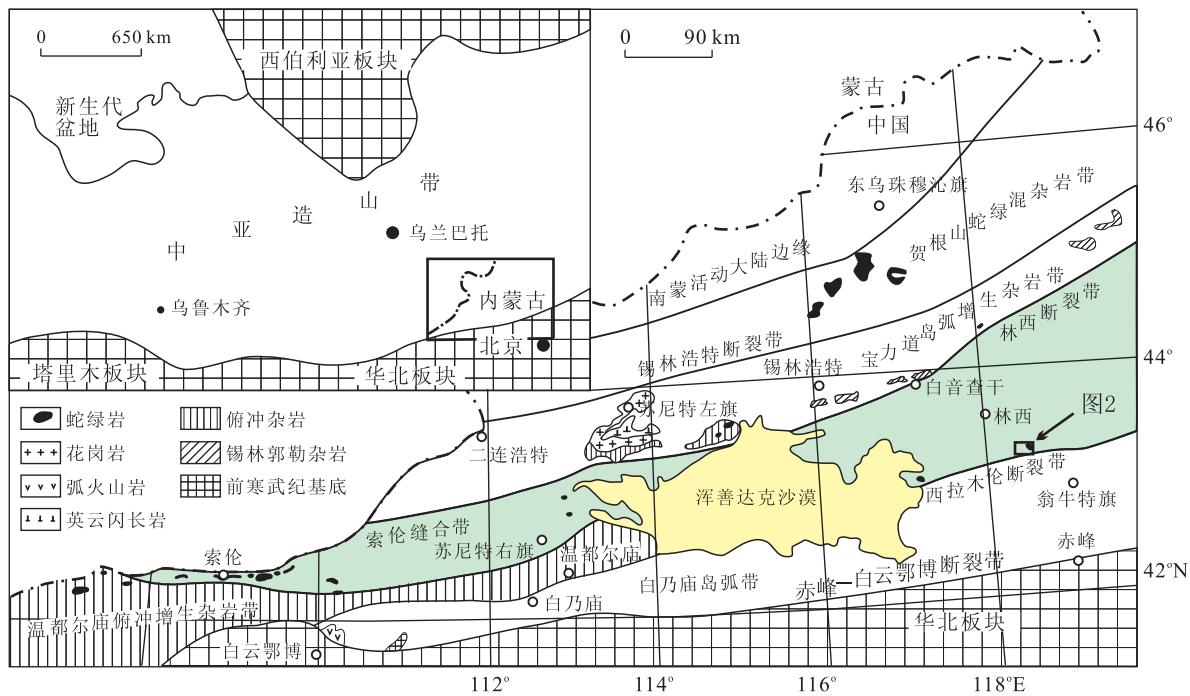


图1 内蒙古中部构造格局略图(据Xiao et al., 2003)

Fig. 1 Structure delineation of central Inner Mongolia

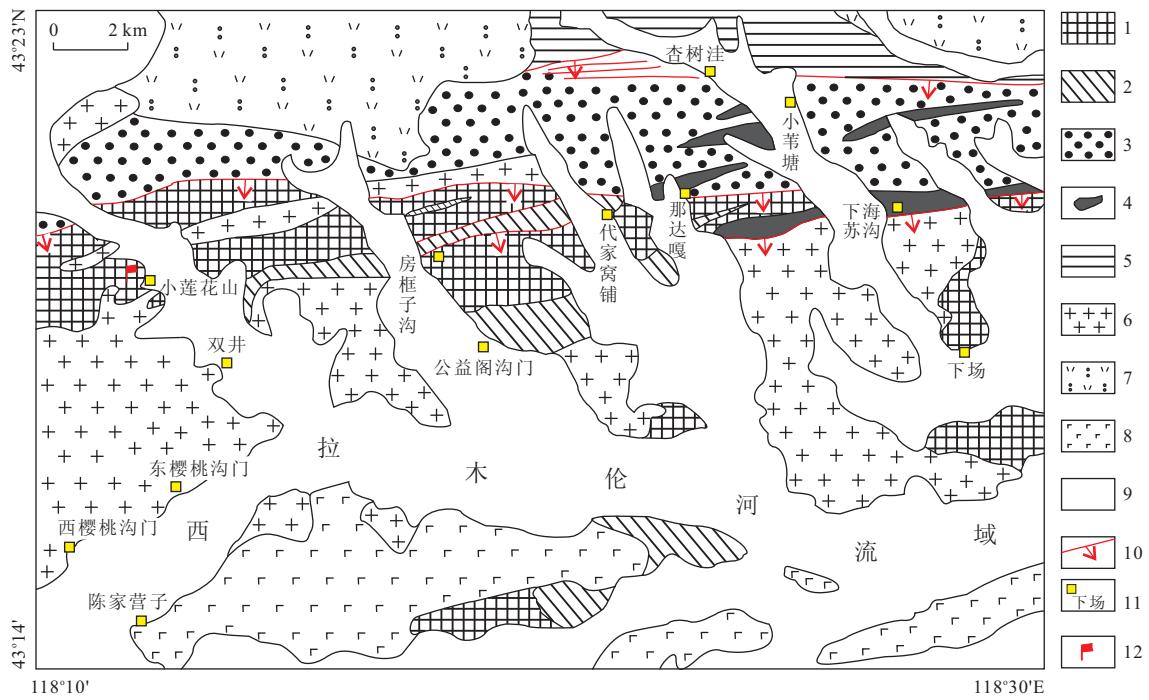


图2 内蒙古林西县双井地区地质简图

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. 中生代侵位岩; 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. 采样点; 图据中国地质大学(武汉)地质调查院, 2008. 内蒙古 1:25万林西县幅区域地质调查报告

运动有关(李益龙等, 2010). 可以看出, 西拉木伦断裂带保留了古亚洲构造域和西太平洋构造域动力作用的物质记录。

在双井片岩中有不少基性侵位体, 多以小岩株产出并具有不同程度的变形构造, 前人对其侵位时间和性质方面的研究至今仍属于空白。笔者对这些

基性侵位体进行了详细的野外考察,采集了代表性的样品进行了岩石学、地球化学、锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄和角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄的研究,期望结合研究区及邻区近年来的新成果,讨论古亚洲构造域和西太平洋构造域在索伦缝合带东段的叠加作用,并为索伦缝合带最终碰撞缝合的时间提供一些有益的信息。

1 地质背景

中亚造山带东段可以划分为 3 部分(图 1):介于华北板块和索伦缝合带之间的南向俯冲增生带,介于南蒙活动大陆边缘和索伦缝合带之间的北向俯冲增生带,以及索伦缝合带(Xiao *et al.*, 2003)。南向俯冲增生带由中奥陶世—早志留世温都尔庙俯冲增生杂岩和白乃庙岛弧杂岩组成;北向俯冲增生带从泥盆纪—石炭纪南蒙活动大陆边缘向南延伸,包括贺根山蛇绿混杂岩和晚石炭世宝力道岛弧增生杂岩。古亚洲洋的俯冲消亡引起了两侧活动大陆边缘的碰撞,并最终导致索伦缝合带的形成(Xiao *et al.*, 2003)。

索伦缝合带和南向俯冲增生带以西拉木伦断裂带为界(图 1),该断裂带为一条宽 20 km,长达数千 km 的复杂断裂带,其深度达莫霍面,属超岩石圈深断裂带。双井片岩发育在该断裂带内,并沿着小莲花山—房框子—那达嘎一线出露(图 2)。双井片岩与北侧的晚志留世西别河组泥质粉砂岩呈断层接触,南侧被二叠纪中期花岗质片麻岩侵位。花岗质片麻岩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)和界线截然的侵位接触关系。双井片岩与花岗质片麻岩均发育有北东东向定向构造,并被中三叠世弱变形—无变形的花岗岩侵位。在小莲花山一带多见岩株状闪长岩侵位于双井片岩中,并发育有与双井片岩一致的定向构造。在双井片岩、花岗质片麻岩及其周围中三叠世侵位体中均有大量的早白垩世中基性岩墙侵位。

2 分析方法

矿物的电子探针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电子探针室完成。实验仪器为 JCXA-733 电子探针分析仪。

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。

进行矿物分离的样品重约 10 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);挑选未见矿物连晶的角闪石单矿物,纯度高于 99%,角闪石先后经过 1 次硝酸和 3 次纯净水清洗、风干。

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+)。锆石 LA-ICPMS 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(Agilent 7500a)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(Andersen, 2002),加权平均年龄及谐和图的绘制采用 ISO-PLOT(ver3.00)(Ludwig, 1991)完成。

角闪石 Ar-Ar 年龄的测试在中国科学院广州地球化学研究所⁴⁰Ar/³⁹Ar 实验室 GV-5400 质谱仪

上采用激光熔样方法完成。激光熔样方法的具体分析流程见文献(蒋映德等,2006)。以本底测定开始,每4个阶段样品分析间插1个本底测定,准确扣除仪器的本底贡献,提高数据质量。中子通量监测标准样品为荷兰阿姆斯特丹自由大学⁴⁰Ar/³⁹Ar实验室所采用的标样(Wijbrans *et al.*, 1995)DRA-1(透长石),其年龄为25.26 Ma。标样用激光加热全熔进行质谱Ar同位素组成分析,求得照射参数J值。然后根据J值变化曲线的函数关系和样品的位置计算出每个样品的J值。实验室测定的大气Ar及照射产生的³⁶Ar、³⁹Ar和⁴⁰Ar利用校正参数(³⁸Ar/³⁶Ar)_a=0.1869, (³⁸Ar/³⁷Ar)_{Ca}=0, (³⁶Ar/³⁷Ar)_{Ca}=2.673×10⁻⁴, (³⁹Ar/³⁷Ar)_{Ca}=8.984×10⁻⁴, (Ar⁴⁰/³⁹Ar)_K=5.97×10⁻³, (Ar³⁸/³⁹Ar)_K=1.211×10⁻²进行校正,数据处理软件为Ar-ArCALC ver2.2c(Koppers, 2002),所用黑云母标样ZBH2506的参考年龄为132.50±0.50 Ma。

3 岩相学和矿物化学

闪长岩样品(8130)采自小莲花山一带,岩体侵位到双井片岩中(图3a),岩体内部可见双井片岩捕虏体,岩体与双井片岩的接触带上可见条痕状混合岩化现象,北东东向片麻理发育,与双井片岩的片理方向基本一致。岩石呈中粒—粗粒粒状变晶结构(图3b),主要组成矿物有:斜长石55%、角闪石30%、绿帘石5%、绿泥石8%、榍石等2%。

样品中斜长石和角闪石的电子探针分析结果列于表1和表2。斜长石均属钠长石种属(An=0~5),指示绿片岩相—绿帘角闪岩相的变质作用。

据Leake(1978)提出的角闪石的分类方案,样

品中角闪石标准分子式中B位置上的Ca、Na原子系数之和(Ca+Na)_B≥1.34, Na_B<0.67,属钙质角闪石组。角闪石的Ti-Si变异图(图4a)显示样品中的角闪石均为变质成因,据Al^{IV}-Al^{VI}图解对样品的变质程度进行进一步判断(图4b),结果显示绿帘角闪岩相变质作用。

4 岩石化学

选择一个新鲜样品进行了全岩地球化学特征分析。岩石中各氧化物的含量为:SiO₂=58.19%, Al₂O₃=14.42%, CaO=6.03%, MgO=4.71%, TFeO=7.38%, MnO=0.20%, TiO₂=0.86%, P₂O₅=0.03%, Na₂O+K₂O=6.50%, LOI=1.24%, Na₂O/K₂O=3.68, Mg[#]=53, 低于原始地幔值(68~75),里特曼指数σ=2.78,属钙碱性系列。

样品的微量元素分析结果列于表3。样品中过渡族元素(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),富集大离子亲石元素(LILE)Ba、Pb,贫高场强元素(HFS)Nb、Ta、Zr、Hf等,在微量元素原始地幔标准化曲线图上(图5a),样品显示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。稀土元素总含量中等,ΣREE=107.61 μg/g,球粒陨石标准化稀土元素配分模式为右倾型(图5b),轻重稀土弱分馏,LREE/HREE=3.05,(La/Yb)_N=2.00;轻稀土弱分馏,(La/Gd)_N=1.68;重稀土略显分馏,(Dy/Yb)_N=1.22;具中等—弱的负铕异常,δEu=0.63,说明部分熔融过程中源区有斜长石残留或者岩浆运移过程中发生了斜长石的分离结晶;Ce略显正异常,δCe=1.13,表明岩浆为快速侵位。

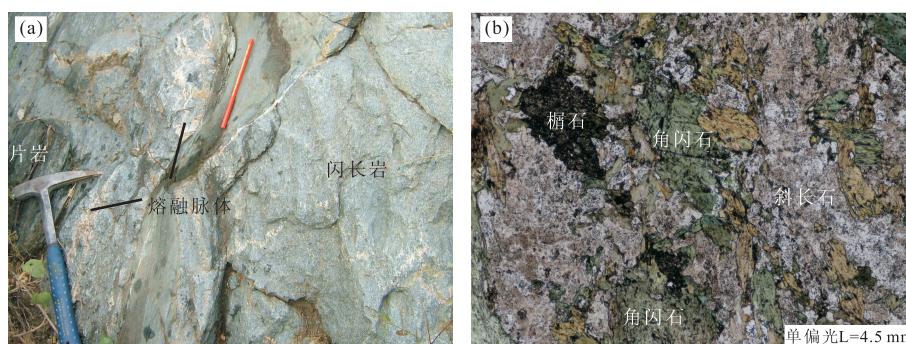


图3 闪长岩的野外露头(a)和显微结构(b)

Fig. 3 Field aspect (a) and photomicrograph (b) of diorite

表 1 闪长岩中斜长石的电子探针分析结果(%)及相关参数

Table 1 Electronic probe analyzing results (%) of plagioclase from diorite and related parameters

样号	点位	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	Σ	An	Ab	Or	种属
8130	小莲山	68.65	0.00	20.01	0.00	0.00	0.00	0.83	10.39	0.16	0.00	100.04	4	95	1	钠长石
		69.48	0.00	20.58	0.00	0.02	0.01	0.90	10.39	0.18	0.00	101.56	5	94	1	
		70.76	0.00	19.78	0.05	0.00	0.00	0.03	9.47	0.13	0.00	100.22	0	99	1	
		69.61	0.00	20.50	0.00	0.00	0.00	0.84	10.35	0.18	0.00	101.48	4	95	1	
		69.69	0.00	20.34	0.00	0.00	0.00	0.80	10.37	0.07	0.00	101.27	4	96	0	
		70.48	0.00	20.32	0.00	0.00	0.00	0.61	10.59	0.09	0.00	102.09	3	96	1	
		70.48	0.00	20.69	0.00	0.00	0.00	0.83	10.37	0.05	0.00	102.42	4	95	0	
		66.73	0.00	19.64	0.00	0.00	0.00	0.76	9.58	0.08	0.00	96.79	4	95	1	
		68.88	0.00	19.82	0.00	0.00	0.00	0.77	10.11	0.08	0.00	99.66	4	95	0	
		69.77	0.00	20.16	0.00	0.00	0.00	0.72	9.97	0.13	0.00	100.75	4	95	1	

表 2 闪长岩中角闪石的电子探针分析结果(%)及相关参数

Table 2 Electronic probe analyzing results (%) of amphibole from diorite and related parameters

样号	点位	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	Σ	Ca ²⁺	Na ⁺	Al ^{IV}	Al ^{VI}	种属
8130	小莲山花山	49.91	0.58	4.04	14.54	0.55	12.87	11.70	0.73	0.22	0.00	95.14	1.87	0.21	0.47	0.24	钙质闪石
		50.80	0.36	4.00	14.67	0.47	13.74	11.68	0.62	0.19	0.00	96.52	1.83	0.18	0.53	0.15	钙质闪石
		49.16	0.50	4.41	15.92	0.46	12.56	11.70	0.74	0.20	0.00	95.66	1.87	0.21	0.61	0.16	
		50.93	0.37	3.79	15.42	0.41	13.48	11.86	0.71	0.19	0.00	97.17	1.86	0.20	0.52	0.13	
		50.81	0.21	3.69	15.33	0.41	13.56	11.46	0.66	0.20	0.00	96.33	1.80	0.19	0.53	0.11	
		49.91	0.58	4.04	14.54	0.55	12.87	11.70	0.73	0.22	0.00	95.14	1.87	0.21	0.47	0.24	
		50.80	0.36	4.00	14.67	0.47	13.74	11.68	0.62	0.19	0.00	96.52	1.83	0.18	0.53	0.15	
		49.16	0.50	4.41	15.92	0.46	12.56	11.70	0.74	0.20	0.00	95.66	1.87	0.21	0.61	0.16	
		50.93	0.37	3.79	15.42	0.41	13.48	11.86	0.71	0.19	0.00	97.17	1.86	0.20	0.52	0.13	
		50.81	0.21	3.69	15.33	0.41	13.56	11.46	0.66	0.20	0.00	96.33	1.80	0.19	0.53	0.11	

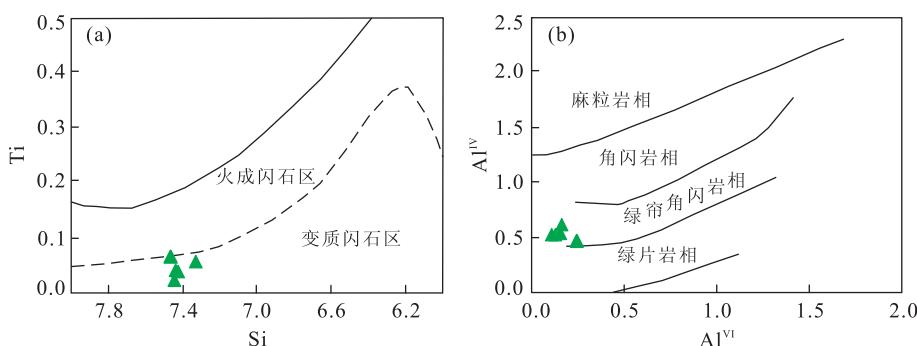
图 4 闪长岩中角闪石 Ti-Si 图解(a)和 Al^{IV}-Al^{VI} 图解(b)Fig. 4 Ti-Si diagram (a) and Al^{IV}-Al^{VI} diagram of amphibole from diorite

图 a 引自 Leake(1978); 图 b 转引自宋明春(1998)

5 年代学

5.1 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年

样品中锆石均自形、短柱状,粒径大,强 CL 强度,具有特征的岩浆振荡环带,显示岩浆结晶锆石的特征,少数颗粒边缘具有很细的变质增生边,显示较弱的后期变质作用(图 6a)。

样品的 LA-ICPMS 锆石分析结果见表 4。共分析了 28 个点,其 Th/U 值变化范围为 0.41~1.24,均大于 0.4, Th 含量变化于 29.86×10^{-6} ~ 355.35×10^{-6} , U 含量变化于 59.15×10^{-6} ~ 286.75×10^{-6} ,显示岩浆锆石的特征。28 个分析点

多偏向谐和线的右侧,表现为 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 比值偏大,而 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的比值则基本相同, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄也相当一致,因此,分析点的偏离应主要与 ^{207}Pb 难以测准有关, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄是准确可信的,28 个分析点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 286 ± 1 Ma (MSWD=0.57)(图 6b)。

5.2 角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年

角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素数据见表 5。对角闪石进行了 12 阶段激光加热分析,在开始的 1 个低温加热阶段给出了较高的年龄,可能为样品局部不均一(或/和矿物颗粒边缘可能有吸附的大气氩存在)所致,之后的 11 个加热阶段获得的年龄谱可以近似看

表3 闪长岩及研究区相似岩石的微量元素分析结果(10^{-6})

Table 3 Compositions of trace elements of the diorite and similar rocks in research area

元素	8130	DSZ1	DSZ2	BBT1	BBT2	ADAK	DYKE
Sc	29.1	29.3	30.0	28.2	11.4	12.1	13.7
V	160	218	225	302	71.50	101	137
Cr	51.4	218	225	56.9	48.3	115	35.4
Co	23.0	102	105	31.5	11.3	37.3	19.7
Ni	21.2	102	105	27.2	16.0	63.4	11.5
Ga	16.3			23.1	20.1	18.6	20.6
Rb	20.6	4.42	4.06	9.8	111	64.6	77.0
Sr	136	296	275	455	175	836	624
Y	44.3	30.0	30.6	29.6	46.1	14.2	20.4
Zr	70.2	167	171	206	559	142	246
Nb	4.96	6.25	6.16	1.50	6.35	3.82	12.7
Cs	0.64	1.14	1.04			1.57	3.36
Ba	387	89.7	83.1	54.7	303	507	1831
La	12.0	14.5	14.8	6.24	14.5	17.0	40.5
Ce	33.8	34.7	34.4	15.9	35.8	39.1	84.2
Pr	4.45	4.99	4.87	2.77	4.61	4.54	10.9
Nd	23.0	23.2	22.3	14.3	20.9	18.4	42.7
Sm	6.44	5.37	5.18	4.11	5.54	3.69	7.64
Eu	1.32	1.97	1.87	1.42	0.90	1.00	2.12
Gd	6.21	5.70	5.48	4.50	6.25	3.06	5.74
Tb	1.14	0.89	0.86	0.87	1.23	0.44	0.79
Dy	7.88	5.25	5.06	5.54	8.12	2.53	4.14
Ho	1.64	1.10	1.06	1.16	1.71	0.50	0.73
Er	4.18	3.00	2.90	3.40	5.22	1.45	1.92
Tm	0.65	0.44	0.42	0.54	0.84	0.21	0.27
Yb	4.31	2.64	2.55	3.56	5.61	1.29	1.59
Lu	0.56	0.38	0.36	0.53	0.84	0.20	0.24
Hf	2.14	3.94	4.02	6.54	16.75	3.75	5.85
Ta	0.31	0.42	0.41	0.10	0.48	0.39	0.86
Pb	7.14	3.33	3.12	2.36	10.5	16.4	117
Th	2.44	0.87	0.89	0.71	8.63	4.30	4.25
U	0.61	0.33	0.31	1.15	2.34	1.43	1.14
(La/Yb) _N	2.00	3.94	4.17	1.26	1.85	9.44	18.31
(La/Gd) _N	1.68	2.21	2.34	1.20	2.00	4.81	6.12
(Dy/Yb) _N	1.22	1.33	1.33	1.04	0.97	1.32	1.75
时代	286 Ma	439 Ma	439 Ma	313~308 Ma	313~308 Ma	244 Ma	132 Ma

注:DSZ1与DSZ2为大石寨组两类玄武岩,引自郭峰等(2009);BBT1与BBT2分别为本巴图组双峰式火山岩中的玄武岩和英安岩,引自汤文豪等(2010);ADAK为林西地区埃达克岩,引自王冬兵等(2009);DYKE为林西地区中性岩墙群,引自李益龙等(2010);8130为本文样品;引用的数值均为各作者报道数值的平均值。

作直线(图7a), ^{39}Ar 的释放量占整个释气量的96.60%,加权平均年龄值(WMPA)为188.7±1.4 Ma,反等时线年龄为191.4±4.5 Ma,MSWD=2.03(图7b),全熔融年龄为190.3±1.0 Ma, $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{i}}$ 初始值为280.8±24.6,在误差范围内与尼尔值(295.5±5)相当,表明该角闪石形成时没有过剩Ar。坪年龄与反等时线年龄吻合,说明角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄真实可信。

6 讨论

6.1 岩浆源区特征

片麻状闪长岩具有较低的SiO₂含量(58.19%),

较高的Mg[#]值(53)和富Na(Na₂O/K₂O=3.68),显示岩浆源区应为岩石圈地幔的属性。样品富集Ba、K、Pb等大离子亲石元素和轻稀土元素,贫重稀土元素和亏损Nb、Ta、Zr、Hf、Ti、P等高场强元素,这一特征主要有两种形成机制:(1)强烈的地壳混染;(2)由于俯冲带流体/熔体交代作用而形成的富集地幔的部分熔融(Cox,1980)。

Nb/U、Ta/U和Ce/Pb比值通常可以作为判断地壳混染的参考指标。样品的Nb/U、Ta/U和Ce/Pb比值分别为8.11、0.50、4.74,明显低于MORB/OIB值(Nb/U=47、Ta/U=2.7和Ce/Pb=25)(Hoffmann,1988),同时也低于地壳值(Nb/U=12.1、Ta/U=1.1和Ce/Pb=4.1)(Tay-

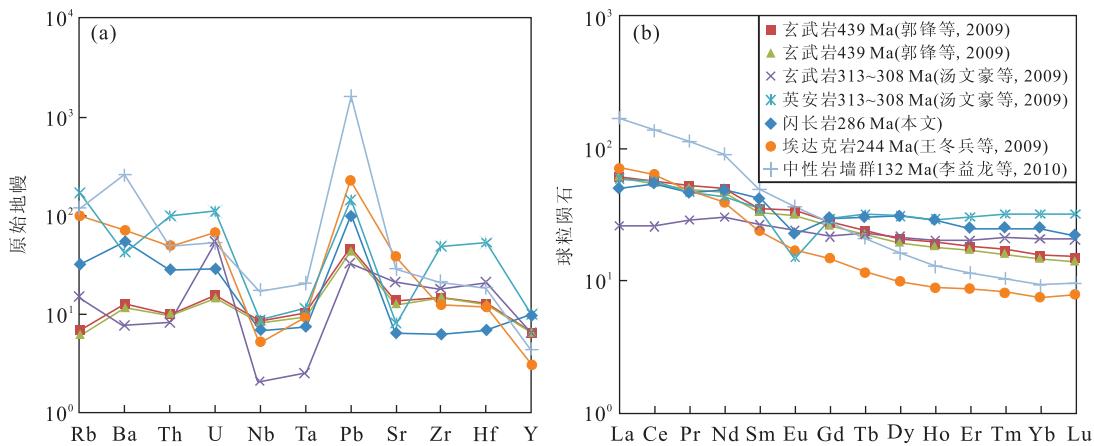


图5 闪长岩及研究区类似岩石的微量元素蛛网图(a)和稀土元素配分模式图(b)(标准值采用 Sun and McDonough (1989) 推荐值)
 Fig. 5 Primitive-mantle normalized trace elements distribution patterns (a) and Chondrite normalized REE distribution pattern (b) of diorite and similar rocks in research area

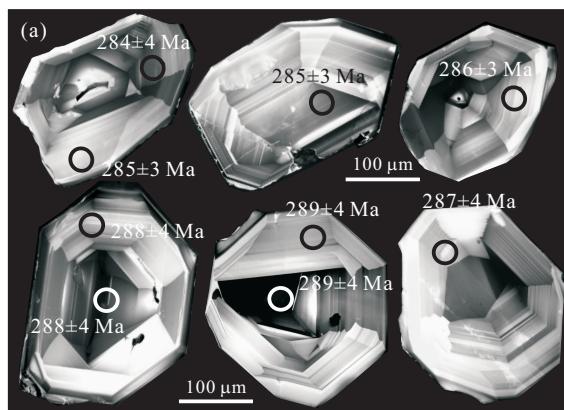
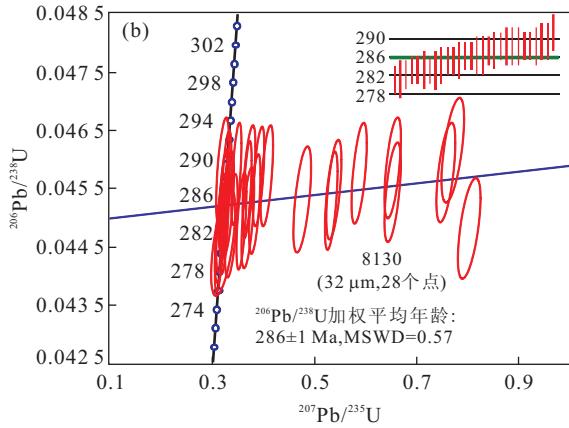


图 6 闪长岩单颗粒锆石 CL 图像(a)和 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 谱和图(b)

Fig. 6 Representative CL images (a) and LA-ICPMS U-Pb Concordia diagram (b) of zircons from diorite
圆圈表示剥蚀激光束对应的位置,直径为 $32 \mu\text{m}$

lor and McLennan, 1995) (Ce/Pb 略高于地壳值), 很难判断其经历了大规模的地壳混染. 样品的 La/Nb 和 Ba/Nb 明显高于陆壳值, 显然不能由低 La/Nb 和 Ba/Nb 的幔源岩浆经陆壳混染或壳幔物质混合熔融形成. 在 Ba/Nb-La/Nb 相关图解中(图 8), 可以看出样品位于弧火山岩的范围内, 处于大陆地壳平均组成的上方, 表明其不是简单陆壳混染的产物. 因此认为闪长岩在其上升过程中没有经历强烈的地壳混染, 其所具有的地球化学特征可能与具有较低 Nb/U、Ta/U 和 Ce/Pb 特征的流体/熔体交代作用的有关.

选择研究区及邻区不同时代的中基性火成岩进行地球化学特征对比(表3)。郭锋等(2009)对索伦缝合带内大石寨组火山岩研究表明:大石寨组包含两组玄武岩,岩浆喷发时间为 439 ± 3 Ma(SHRIMP



锆石 U-Pb 年龄), 是同俯冲作用的结果, 岩浆来源于古亚洲洋俯冲板片交代地幔楔的熔融产物, 两组玄武岩同位素组成上的差异指示受到不同程度俯冲沉积物的改造作用。汤文豪等(2010)对缝合带内本巴图组火山岩研究表明: 本巴图组火山岩为一套双峰式火山岩组合, 岩浆喷发于 313~308 Ma(全岩 Rb-Sr 等时线年龄和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄), 形成于碰撞后的伸展环境, 其中的基性岩浆来源于深部地幔岩的部分熔融, 基性岩浆上升过程中发生演化, 并且古老的陆壳物质或岛弧物质加入其中形成酸性岩浆。王冬兵等(2009)对林西地区早中生代火山岩的研究表明: 岩石具有大洋型(O 型)高镁埃达克质安山岩的地球化学特征, 岩浆喷发于 244±2 Ma(LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄), 是由残余洋壳部分熔融并随后与地幔橄榄岩相互作用形成的。本



表5 闪长岩中角闪石激光熔样法⁴⁰Ar-³⁹Ar测年结果
Table 5 ⁴⁰Ar/³⁹Ar dationg results of amphibole from diorite

激光输出能量(W)	³⁶ Ar(a)	³⁷ Ar(Ca)	³⁸ Ar(Cl)	³⁹ Ar(K)	⁴⁰ Ar(r)	年龄(Ma)	±2δ	⁴⁰ Ar(r)(%)	³⁹ Ar(K)(%)	K/Ca	±2δ
4.00	0.000 040	0.020 491	0.000 007	0.001 796	0.025 839	238.82	3.81	68.34	3.40	0.049	0.005
5.00	0.000 048	0.033 766	0.000 010	0.002 795	0.031 085	187.40	3.94	68.85	5.28	0.046	0.004
6.00	0.000 084	0.062 494	0.000 017	0.004 982	0.055 101	186.37	3.24	68.92	9.42	0.045	0.004
6.90	0.000 085	0.081 101	0.000 022	0.006 429	0.072 192	189.09	2.41	74.06	12.15	0.044	0.004
7.80	0.000 106	0.101 005	0.000 029	0.008 082	0.091 066	189.70	2.55	74.42	15.28	0.045	0.004
8.60	0.000 087	0.101 405	0.000 028	0.007 584	0.083 842	186.31	2.32	76.49	14.34	0.042	0.004
9.40	0.000 067	0.086 576	0.000 024	0.006 153	0.068 843	188.43	2.43	77.73	11.63	0.040	0.004
10.40	0.000 044	0.063 554	0.000 018	0.004 963	0.056 349	191.08	2.34	81.14	9.38	0.044	0.004
11.60	0.000 036	0.065 804	0.000 019	0.004 740	0.053 873	191.25	2.67	83.41	8.96	0.040	0.004
13.60	0.000 021	0.050 571	0.000 014	0.003 250	0.036 650	189.87	2.97	85.31	6.14	0.036	0.003
17.00	0.000 005	0.009 958	0.000 003	0.000 609	0.006 682	184.99	7.14	80.49	1.15	0.034	0.003
25.00	0.000 014	0.023 788	0.000 006	0.001 508	0.016 506	184.58	4.16	80.45	2.85	0.035	0.003

8130, 角闪石, 坪年龄=188.7±1.4 Ma, J-value=0.009 840 5 ± 0.000 014 8, 全气体年龄=190.3±1.0 Ma

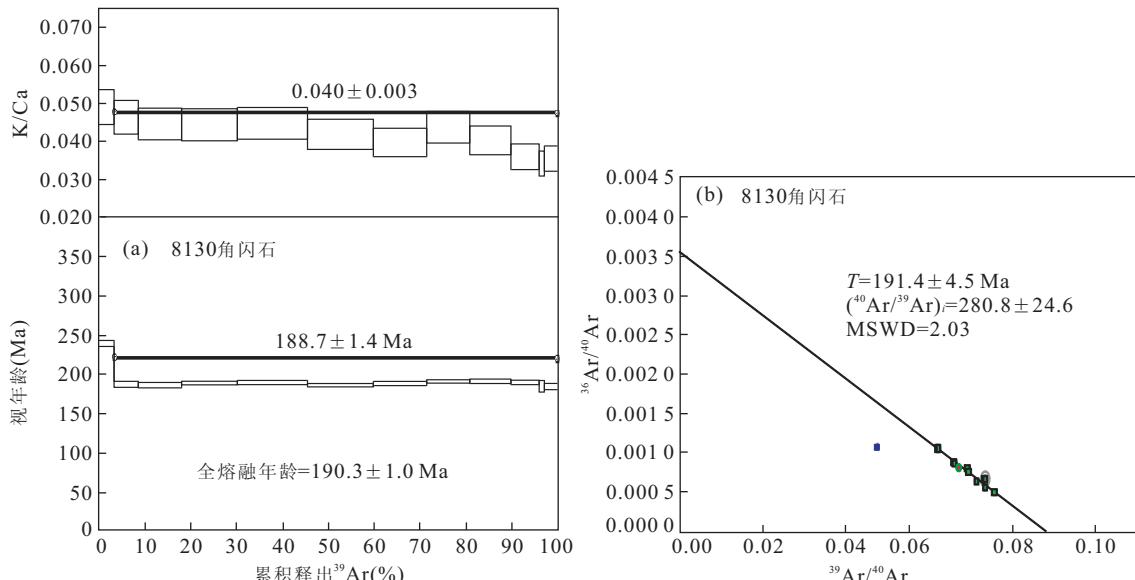


图7 闪长岩中角闪石⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄谱(a)与反等时线(b)

Fig. 7 Apparent age spectrum (a) and inverse isochron line (b) of amphibole from diorite

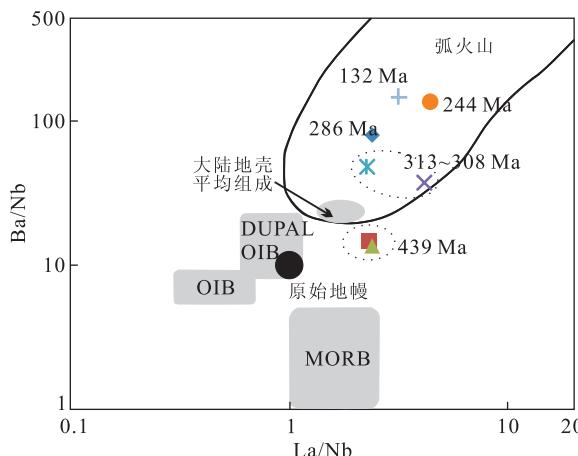
益龙等(2010)对林西地区晚中生代的中性岩墙群的研究表明:岩浆喷发于132.2±2.2 Ma(LA-ICPMS锆石U-Pb年龄),形成于板内拉张环境,岩浆源区具有壳幔混源的特征,是早期俯冲洋壳改造幔源岩浆的结果。可以看出,索伦缝合带内这些不同时代的镁铁质岩石均来源于相对富集LILE、LREE的地幔,与俯冲流体或熔体的改造作用相关,并且随着时代的更新改造程度显示增强的趋势(图8)。

本文研究的闪长岩与本巴图组双峰式火山岩(313~308 Ma)中的酸性岩具有较为相似的元素分配型式(图5),表明样品遭受了较强的俯冲带流体/熔体交代作用。俯冲流体/熔体对岩石圈地幔强烈的改

造使样品显示岛弧火山岩的特征,张玉涛等(2006)报道的大兴安岭北部内蒙古扎兰屯东侧的120.6±4.7 Ma(LA-ICPMS U-Pb年龄)中性岩墙群显示岛弧火山岩的特征,李益龙等(2010)报道的林西地区132.2±2.2 Ma(LA-ICPMS 锆石U-Pb年龄)中性岩墙群也显示岛弧火山岩的特征,这显然与该时期区域背景不符,考虑索伦缝合带早古生代以来的中基性火山岩均显示俯冲沉积物对地幔源区不同程度的改造,对缝合带内火成岩构造环境的判别时需结合区域背景进行分析,而不能进行简单投图。

6.2 对古亚洲构造域的指示

中亚造山带的形成与古亚洲洋的演化密切相关

图8 闪长岩中 Ba/Nb - La/Nb 相关图解Fig. 8 Ba/Nb - La/Nb diagram of diorite

MORB, OIB, 原始地幔采用 Sun and McDonough(1989)推荐值

(Tang, 1990; Sengör *et al.*, 1993). 索伦缝合带记录了古亚洲洋闭合的构造演化过程,但对最终碰撞缝合的时间一直存在不同认识,如:奥陶纪—志留纪(Tang 1990; Tang and Yan 1993; Han *et al.*, 1997; Kheraskova *et al.*, 2003),泥盆纪—早石炭纪(Hendrix *et al.*, 1996; Yue *et al.*, 2001; Sologomovich and Trifonov 2002; Charvet *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2007a);二叠纪—早三叠纪(Sengör *et al.*, 1993; Chen *et al.*, 2000; Xiao *et al.*, 2003, 2009).

Zhang *et al.* (2009a)在华北板块北缘识别出两条不同的侵位岩带:晚石炭世($324\sim300$ Ma)闪长岩—花岗闪长岩带,主要由石英闪长岩、闪长岩、花岗闪长岩、英云闪长岩和角闪辉长岩组成;晚二叠世—中三叠世($254\sim237$ Ma)花岗岩带,主要由二长花岗岩、正长花岗岩和石英二长岩组成。前者喷发于安第斯型大陆边缘,是古亚洲洋板块向华北板块俯冲过程中俯冲地壳熔融交代富集型地幔的产物,后者为后碰撞花岗岩,来源于壳幔混源的富流体岩浆的分离结晶,是蒙古岛弧地体与华北板块最终碰撞缝合后岩石圈伸展和软流圈底侵作用的结果。汤文豪等(2010)研究认为索伦缝合带内本巴图组双峰式火山岩($313\sim308$ Ma)形成于碰撞后的伸展环境,指示索伦缝合带在晚石炭世之前曾经发生过闭合碰撞。张玉清等(2009b)报道内蒙古东乌珠穆沁旗京格斯台碱性花岗岩 TIMS 锆石 U-Pb 年龄 284.8 ± 1.1 Ma,指示后造山伸展环境;Shi *et al.* (2004)报道内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 276 ± 2 Ma,指示该拉张伸展的构造环境持

续到了早二叠世。本文研究的闪长岩喷发于 285.6 ± 1.3 Ma,样品记录了研究区晚石炭世—早二叠世后造山伸展的背景。Zhang *et al.* (2009a)在华北北缘识别出的晚石炭世($324\sim300$ Ma)闪长岩—花岗闪长岩带即可能为华北北缘在后造山伸展环境下的产物,该闪长岩—花岗闪长岩带的时限应延伸到早二叠世,如:袁桂邦和王惠初(2006)获得内蒙古武川石英闪长岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 282 ± 5 Ma;王惠初等(2007b)测得冀北丰宁—承德(石英)闪长岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 288 ± 5 Ma~ 280 ± 6 Ma;以及本文在内蒙古林西地区获得的闪长岩的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 285.6 ± 1.3 Ma。

陈斌等(2001)对苏尼特左旗南的弧岩浆岩和碰撞花岗岩分别进行了定年,在弧岩浆岩中得出锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 490 ± 8 Ma 和 309 ± 8 Ma,在碰撞花岗岩中得出 Rb-Sr 全岩等时线年龄 228 ± 21 Ma 和锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 254 ± 4 Ma;李益龙等(2009)获得内蒙古林西地区房框子单元 S 型花岗岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄 271.9 ± 1.6 Ma 和 264.8 ± 1.8 Ma;李锦轶等(2007)获得侵位于房框子单元南部的双井子单元 S 型花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 229.2 ± 4.1 Ma 和 237.5 ± 2.7 Ma;暗示索伦缝合带在经历了晚石炭世—早二叠世后造山伸展背景后又转入了碰撞造山背景。王玉净和樊志勇(1997)在林西地区杏树洼蛇绿岩中发现了中晚二叠世放射虫化石,尚庆华(2004)在锡林浩特地区褶斯组地层中发现了晚二叠世放射虫化石,指示晚二叠世索伦缝合带中洋盆的存在。对于该洋盆是古亚洲洋的残余(张永焕等,2000; Kravichinsky *et al.*, 2002; Li, 2006)还是晚石炭世—早二叠世拉张背景下的新生洋盆(Tang, 1990; 邵济安, 1991; 唐克东, 1992),目前国内外学者还没有达成一致的意见。缝合带中晚二叠世—中三叠世碰撞花岗岩的形成可能与该洋盆的闭合有关,Zhang *et al.* (2009a)在华北板块北缘识别出的晚二叠世—中三叠世($254\sim237$ Ma)后碰撞花岗岩带表明索伦缝合带的最终碰撞缝合在空间上的不均一性,其最终的缝合在晚二叠世—中三叠世完成。

6.3 对西太平洋构造域的指示

索伦缝合带东段在晚二叠世—中三叠世完成最终的碰撞缝合,导致缝合带以北的中蒙陆块、南蒙陆块、额尔古纳陆块、佳木斯陆块等微陆块与华北板块的完全拼合,古亚洲洋至此完全消亡,此时蒙古—鄂霍次克海作为古太平洋的一个分支北东向展布于西

伯利亚板块和拼合后的华北板块之间(图 9; Li, 2006)。早期的研究认为蒙古—鄂霍次克海的闭合是洋壳向北侧的西伯利亚板块俯冲的结果,而南侧的华北板块北缘(确切地说应为拼合到华北板块的各微陆块的北缘)为被动型大陆边缘(Zonenshain *et al.*, 1990; Parfenov *et al.*, 1995; Zorin, 1999)。然而,近年来对黑龙江地区岩浆岩的研究(Sorokin *et al.*, 2002; 张永清等,2002; 张炯飞等,2003; 李锦轶,2004)和长白山地区火山—沉积岩系及花岗岩的研究(李锦轶等,1999; 李永安等,1999)认为额尔古纳陆块和佳木斯陆块北缘晚古生代以来长期存在活动大陆边缘的演化,因此,蒙古—鄂霍次克洋壳在向北侧的西伯利亚板块俯冲的同时向南侧的额尔古纳陆块和佳木斯陆块北缘也发生俯冲(Li, 2006)。洋壳的持续俯冲导致了蒙古—鄂霍次克海的不断萎缩。研究表明,蒙古—鄂霍次克海从西向东呈剪刀状闭合,石炭一二叠纪在蒙古中部发生闭合,三

叠—早侏罗世在蒙古东北部发生闭合(Zorin, 1999; Kravchinsky *et al.*, 2002; Cogné *et al.*, 2005; Tomurtagoo *et al.*, 2005),晚侏罗世蒙古—鄂霍次克海在俄罗斯远东地区彻底消亡,华北板块和西伯利亚板块最终碰撞拼合(Ying *et al.*, 2010)。本文研究的变形闪长岩中角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 $188.7 \pm 1.4\text{ Ma}$,由于角闪石 K-Ar 体系封闭温度较低($\sim 510^\circ\text{C}$; Dodson and McClelland-Brown, 1985),该年龄代表了闪长岩遭受最后一次明显变质事件的时间,该事件很可能与三叠—早侏罗世蒙古—鄂霍次克海在蒙古东北部闭合后的陆—陆碰撞有关,之后蒙古东北部进入了后造山伸展环境。

古太平洋板块向华北板块的西向俯冲在晚侏罗世达到峰期,并转化为向欧亚大陆西北向斜向俯冲(Maruyama *et al.*, 1997; Sagong *et al.*, 2005),俯冲方向的改变导致了中生代华北东部由挤压向拉张

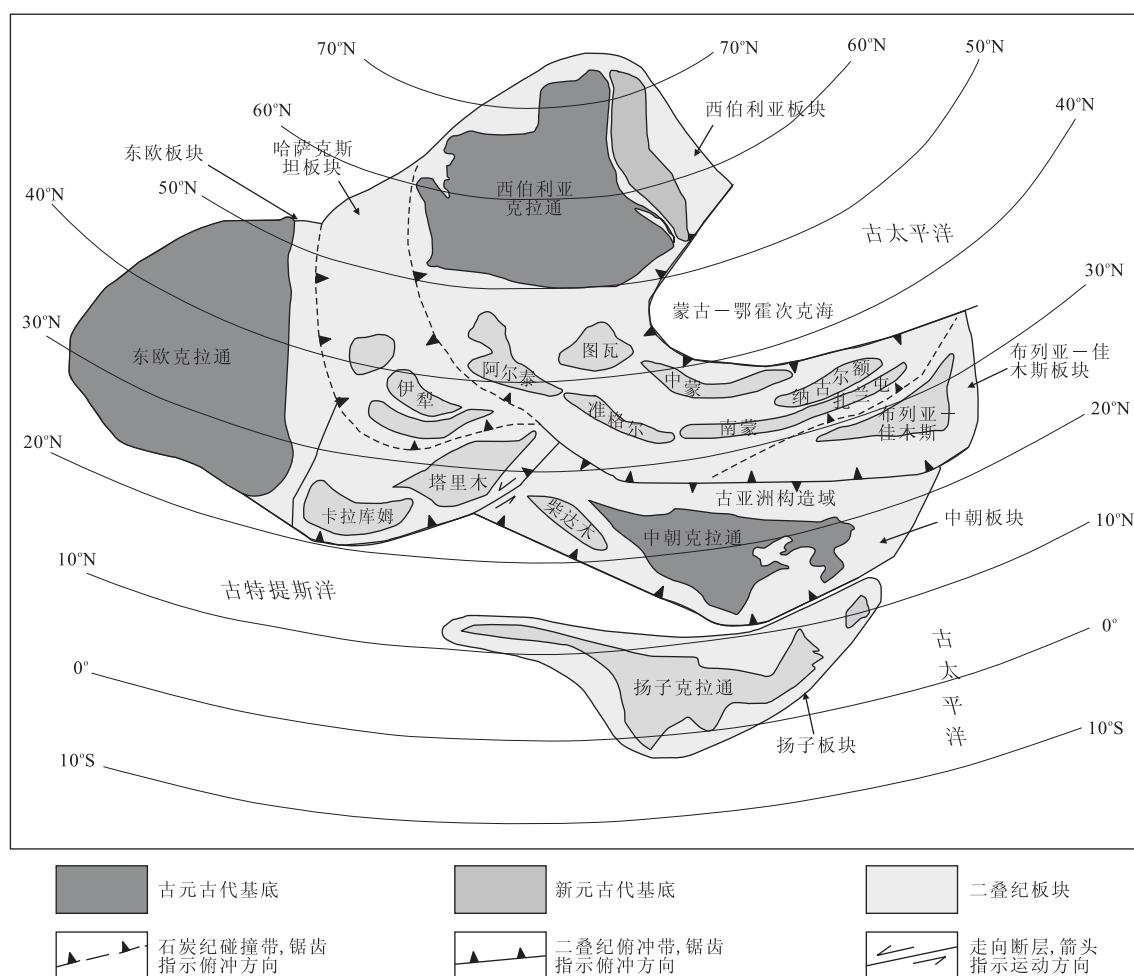


图 9 晚二叠世中国东北部及邻区洋—陆构造格局复原图(据 Li, 2006)

Fig. 9 Palinspastic reconstruction of Late Permian ocean-continent framework of northeastern China and adjacent regions

的转变(Zhang *et al.*, 2010). Shao *et al.* (1998)将林西地区广泛分布的辉绿岩岩墙群分为3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),反映了林西地区侏罗纪挤压与拉张多次交替出现的构造体制。历年来关于华北岩石圈中生代岩浆活动时序的研究成果表明该构造机制转变的起始时段为160~140 Ma,峰值时段为120 Ma(周新华,2006,2009)。

研究区在侏罗纪构造机制的交替转换表明控制该时期构造格局的动力机制不只有一种,而应是两种或多种动力机制共同作用的结果。早侏罗世蒙古—鄂霍次克海在蒙古东北部发生闭合,随后进入后造山拉张的背景,研究区在该时期存在近南北向拉张的应力作用。而古太平洋板块向华北板块的西向俯冲持续到了晚侏罗世,研究区在侏罗纪还应存在东西向挤压的应力作用。两种应力的共同作用导致了研究区在侏罗纪构造机制的交替转换。Xu(2001)认为这种早期构造机制的交替转换可能还受到华南板块与华北板块碰撞的影响。

晚侏罗世古太平洋板块俯冲方向转变后,中国东部进入持续的拉张背景,在拉张机制下,华北东部地区存在普遍发育的中生代岩浆活动(吴福元等,1999;洪大卫等,2000;邵济安等,2001;张玉涛等,2006)。目前,对于中国东部岩石圈减薄的地球动力学背景普遍认为是太平洋板块的俯冲作用导致岩石圈加厚,进而发生岩石圈拆沉(吴福元等,2003;邓晋福等,2006;徐义刚,2006)。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与太平洋板块俯冲引起的地幔对流的加强有关。

7 结论

(1)内蒙古林西县西拉木伦断裂带内的变形闪长岩侵位于早二叠世,其锆石LA-ICPMS U-Pb年龄为286±1 Ma。岩浆来源于俯冲带流体/熔体交代作用而形成的富集地幔。岩石遭受了早侏罗世绿帘角闪岩相变质作用,角闪石⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄为188.7±1.4 Ma。

(2)索伦缝合带早古生代以来的中基性火山岩均显示俯冲沉积物对地幔源区不同程度的改造,并且随着时代的更新改造程度有增强的趋势。索伦缝合带在晚石炭世(~310 Ma)之前曾经闭合过,晚石

炭世—早二叠世(~310~276 Ma)处于后造山伸展的背景,在伸展环境下形成了华北北缘该时期广泛分布的闪长岩—花岗闪长岩带,本文报道的闪长岩即为该时期的产物。晚二叠世缝合带局部区域中存在洋盆,洋盆的闭合导致了晚二叠世—中三叠世(~272~230 Ma)索伦缝合带的最终碰撞缝合,最终碰撞缝合在空间上的不均一性形成了缝合带内该时期大量并存的同碰撞花岗岩和后碰撞花岗岩。

(3)索伦缝合带的缝合导致华北板块与其北部各微陆块的拼合,此时蒙古—鄂霍次克海作为古太平洋的一个分支北东向展布于西伯利亚板块和拼合后的华北板块之间。早侏罗世蒙古—鄂霍次克海在蒙古东北部发生闭合,本文报道的角闪石⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄记录了洋壳闭合后陆—陆碰撞的变质时间,之后研究区进入后造山伸展的环境。此时在古太平洋板块向华北板块俯冲应力的共同作用下,华北东部在侏罗纪出现挤压机制与拉张机制的多次转换。晚侏罗世古太平洋板块俯冲方向转变后,中国东部进入持续的拉张背景,并转入西太平洋构造域的范畴。

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 ²⁰⁴Pb. *Chemical Geology*, 192(1–2): 59–79. doi:10.1016/S0009-2541(02)00195-X
- Badarch, G., Cunningham, 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
- Charvet, J., Shu, L., Laurent-Charvet, S., 2007. Paleozoic structural and geodynamic evolution of eastern Tianshan (NW China): welding of the Tarim and Junggar plates. *Episodes*, 30(3):162–185.
- Chen, B., Jahn, B. M., Wilde, S., et al., 2000. Two contrasting paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 328(1–2):157–182. doi:10.1016/S0040-1951(00)00182-7
- Chen, B., Zhao, G. C., Wilde, S., 2001. Subduction- and collision-related granitoids from southern Sonidzuqi, Inner Mongolia: isotopic ages and Tectonic Implications. *Geo-*

- logical Review*, 47(4): 361—367 (in Chinese with English abstract).
- Cogné, J. P., Kravchinsky, V. A., Halim, N., et al., 2005. Late Jurassic-Early Cretaceous closure of the Mongol-Okhotsk Ocean demonstrated by new Mesozoic palaeomagnetic results from the Trans-Baikal area (SE Siberia). *Geophysical Journal International*, 163(2): 813—832. doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02782.x
- Cox, K. G., 1980. A model for flood basalt volcanism. *Journal of Petrology*, 21(4): 629—650. doi:10.1093/petrology/21.4.629
- 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).
- Dodson, M. H., McClelland-Brown, E., 1985. Isotopic and palaeomagnetic evidence for rates of cooling, uplift and erosion. *Geological Society of London*, 10: 315—325. doi:10.1144/GSL.MEM.1985.010.01.26
- Fukao, Y., Obayashi, M., Inoue, H., et al., 1992. Subducting slabs stagnant in the mantle transition zone. *Journal of Geophysical Research*, 97(B4): 4809—4822. doi:10.1029/91JB02749
- Guo, F., Fan, W. M., Li, C. W., et al., 2009. Early Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: geochronological and geochemical evidence from the Dashizhai basalts, Inner Mongolia. *Science in China (Ser. D)*, 52(7): 940—951. doi:10.1007/s11430-009-0083-2
- Han, B. F., Wang, S. G., Jahn, B. M., et al., 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*, 138(3—4): 135—159. doi:10.1016/S0009-2541(97)00003-X
- Hendrix, M. S., Graham, S. A., Amory, J. Y., et al., 1996. Noyon Uul Syncline, southern Mongolia: lower Mesozoic sedimentary record of the tectonic amalgamation of Central Asia. *Geological Society of America Bulletin*, 108: 1256—1274. doi:10.1130/0016-7606(1996)108<1256:NUSSML>2.3.CO;2
- Hoffmann, A. W., 1988. Chemical differentiation of the earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planet Science Letters*, 90: 297—314. doi:10.1016/0012-821X(88)90132-X
- Hong, D. W., Wang, S. G., Xie, X. L., et al., 2000. Genesis of positive $\epsilon(\text{Nd}, t)$ granitoids in the Da Hinggan MTS. *Mongolia organic belt and growth continental crust. Earth Science Frontiers*, 7(2): 441—456 (in Chinese with English abstract).
- 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
- Jiang, Y. D., Qiu, H. N., Xiao, H. J., 2006. Sphalerite fluid inclusions Ar-Ar dating research. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 25(2): 198—199 (in Chinese with English abstract).
- 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
- Kheraskova, T. N., Didenko, A. N., Bush, V. A., et al., 2003. The Vendian-Early Paleozoic history of the continental margin of eastern Paleogondwana, Paleoasian Ocean, and Central Asian foldbelt. *Russian Journal of Earth Sciences*, 5(3): 165—184. doi:10.2205/2003ES000123, 2003
- Koppers, A. A. P., 2002. ArArCALC-software for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age calculations. *Computers & Geosciences*, 28(5): 605—619. doi:10.1016/S0098-3004(01)00095-4
- Kravchinsky, V. A., Sorokin, A. A., Courtillot, V., 2002. Paleomagnetism of Paleozoic and Mesozoic sediments from the southern margin of Mongol-Okhotsk ocean, far eastern Russia. *Journal of Geophysical Research*, 107(B10): 2253. doi:10.1029/2001JB000672
- Leake, B. E., 1978. Nomenclature of amphiboles. *American Mineralogist*, 63(11—12): 1023—1052.
- Li, J. Y., 2004. Late neoproterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China. *Geological Review*, 50(3): 304—322 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3—4): 207—224. doi:10.1016/j.jseaes.2005.09.001

- Li, J. Y. , Gao, L. M. , Sun, G. H. , et al. , 2007. Shuangjinzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565—582 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y. , Niu, B. G. , Song, B. , et al. , 1999. Crustal formation and evolution of northern Changbai Mountains, Northeast China. Geological Publishing House, Beijing, 137 (in Chinese).
- Li, Y. A. , Sun, D. J. , Zheng, J. , 1999. Paleomagnetic study and tectonic evolution of Xinjiang and its neighboring regions. *Xinjiang Geology*, 17(3): 97—139 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L. , Zhou, H. W. , Brouwer, F. M. , et al. , 2011. Tectonic significance of the Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China: petrological, geochemical and U-Pb zircon age constraints. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5): 1018—1029. doi: 10.1016/j.jseas.2010.09.009
- Li, Y. L. , Zhou, H. W. , Ge, M. C. , et al. , 2007. Characteristics and genesis of migmatites within the northern Shuangjing micro-plate in the west Lamulun fault zone, Inner-Mongolia Province. *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-ICPMS zircon U-Pb dating of migmatite from north 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-ICPMS zircon U-Pb age on deformed granite in Xar Moron suture zone. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(6): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L. , Zhou, H. W. , Zhong, Z. Q. , et al. , 2010. 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. *Earth Sciences—Journal of China University of Geosciences*, 35(6): 921—932 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R. , 1991. Isoplot: a plotting and regression program for radiogenic-isotope data. US Geological Survey Open-File Report, 39: 91—445.
- Maruyama, S. , Isozaki, Y. , Kimura, G. , et al. , 1997. Paleogeographic maps of the Japanese islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, 6(1): 121—142. doi:10.1111/j.1440—1738.1997.tb00043.x
- Miao, L. C. , Fan, W. M. , Liu, D. Y. , et al. , 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling orogenic belt, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5—6): 348—370. doi:10.1016/j.jseas.2007.11.005
- Parfenov, L. M. , Bulgatov, A. N. , Gordienko, I. V. , 1995. Terranes and accretionary history of the Transbaikal orogenic belts. *International Geology Review*, 37(8): 736—751. doi: 10.1080/00206819509465425
- 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. *Geostandards Newsletter*, 21(1): 115—144. doi: 10.1111/j.1751—908X.1997.tb00538.x
- Sagong, H. , Kwon, S. T. , Ree, J. H. , 2005. Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, 24 (5): TC5002. doi: 10.1029/2004TC001720
- Sengör, A. M. C. , Natal'in, B. A. , Burtman, V. S. , 1993. Evolution of the Altai tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 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. , 1991. Crustal evolution in the middle part of the northern margin of Sino-Korean Plate. Beijing University Press, Beijing, 136 (in Chinese).
- 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 (2): 99—103. doi:10.1016/j.epact.2005.05.031
- Shao, J. A. , Zhang, L. Q. , Wei, C. J. , et al. , 2001. 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).
- Shi, G. H. , Miao, L. C. , Zhang, F. Q. , et al. , 2004. Emplacement age and tectonic implications of the Xilinhote A-type granite in Inner Mongolia, China. *Chinese Science Bulletin*, 49(7): 723—729. doi: 10.1007/BF03184272
- Solomovich, L. I. , Trifonov, B. A. , 2002. Post-collisional granites in the South Tien Shan variscan collisional belt, Kyrgyzstan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21 (1): 7—21. doi:10.1016/S1367—9120(02)00008—1
- Song, B. , Zhang, Y. H. , Wan, Y. S. , et al. , 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geolog-*

- ical Review*, 48 (Suppl.): 26—30 (in Chinese with English abstract).
- Song, M. C., 1998. Preliminary study on the amphibolites in the metamorphic rock series of Jiaonan orogenic zone. *Shandong Geology*, 14(4): 25—30 (in Chinese with English abstract).
- Sorokin, A. A., Kudryashov, N. M., Sorokin, A. P., 2002. Fragments of Paleozoic active margins at the southern periphery of the Mongolia-Okhotsk foldbelt: evidence from the northeastern Argun terrane, Amur river region. *Doklady Earth Sciences*, 387A: 1038—1042.
- 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 Special Publication*, 42(1): 313—345. doi: 10.1144/SP1989.042.01.19
- Tang, K. D., 1990. Tectonic development of Paleozoic fold belts at the north margin of the Sino-Korean craton. *Tectonics*, 9(2): 249—260. doi: 10.1029/TC009i002p00249
- Tang, K. D., 1992. Tectonic evolution and mineralogenetic regularities of the fold belt along the northern margins of Sino-Korean plate. Beijing University Press, Beijing, 277 (in Chinese).
- Tang, K. D., Yan, Z. Y., 1993. Regional metamorphism and tectonic evolution of the Inner Mongolian suture zone. *Journal of Metamorphic Geology*, 11(4): 511—522. doi: 10.1111/j.1525-1314.1993.tb00168.x
- Tang, W. H., Zhang, Z. C., Li, J. F., et al., 2010. Geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks of Benbatu formation in Sonid Youqi, Inner Mongolia and its geochemical significance. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 3: 62—71 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, S. R., McLennan, S., 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241—265. doi: 10.1029/95RG00262
- Tomurtogoo, O., Windley, B. F., Kroner, A., et al., 2005. Zircon age and occurrence of the Adaatsag ophiolite and Muron shear zone, Central Mongolia: constraints on the evolution of the Mongol-Okhotsk ocean, suture and orogen. *Journal of the Geological Society*, 162(1): 125—134. doi: 10.1144/0016-764903-146
- Wang, B., Chen, Y., Zhan, S., et al., 2007a. Primary Carboniferous and Permian paleomagnetic results from the Yili Block (NW China) and their implications on the geodynamic evolution of Chinese Tianshan belt. *Earth and Planetary Science Letters*, 263(3—4): 288—308. doi: 10.1016/j.epsl.2007.08.037
- Wang, H. C., Zhao, F. Q., Li, H. M., et al., 2007b. Zircon SHRIMP U-Pb age of the dioritic rocks from northern Hebei: the geological records of late Paleozoic magmatic arc. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 597—604 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. B., Liu, Y. S., Zong, K. Q., et al., 2009. Early Mesozoic O-type high-Mg Adakitic andesites from Linxi area, Inner Mongolia and its implication. *Geological Science and Technology Information*, 28(6): 32—38 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Fan, Z. Y., 1997. Discovery of Permian radiolarians in ophiolite belt on Northern side of Xar Moron River, Nei Mongol and its geological significance. *Acta Palaeontologica Sinica*, 36(1): 58—69 (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. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1—23. doi: 10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x
- Wijbrans, J. R., Pringle, M. S., Koppers, A. A. P., et al., 1995. Argon geochronology of small samples using the Vulkaan argon laserprobe. *Proc. Kon. Ned. Akad. v. Wetensch*, 98(2): 185—218.
- Windley, B. F., Alexeiev, D., Xiao, W. J., et al., 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian orogenic belt. *Journal of the Geological Society*, (London) 164(1): 31—47. doi: 10.1144/0016-76492006-022
- 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., 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181—189 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Huang, B. C., Han, C. M., et al., 2010. A review of the western part of the Altaids: a key to understanding the architecture of accretionary orogens. *Gondwana Research*, 18(2—3): 253—273. doi: 10.1016/j.gr.2010.01.007
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Hao, J., et al., 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: termination of the Central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22(6): 1069. doi: 10.1029/2002TC001484
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Huang, B. C., et al., 2009. End-Permian to mid-triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth,

- and metallogeny of Central Asia. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1189—1217. doi: 10.1007/s00531-008-0407-z
- 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).
- Ying, J. F., Zhou, X. H., Zhang, L. C., et al., 2010. Geochronological framework of Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an range, NE China, and their geodynamic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(6): 786—793. doi: 10.1016/j.jseaes.2010.04.035
- Yuan, G. B., Wang, H. C., 2006. Magmatic activity and its tectonic implications during the Early Permian in the northwestward of Wuchuan, Inner Mongolia. *Geological Survey and Research*, 29(4): 303—308 (in Chinese with English abstract).
- Yue, Y., Liou, J. G., Graham, S. A., 2001. Tectonic correlation of Beishan and Inner Mongolia orogens and its implications for the palinspastic reconstruction of North China. In: Hendrix, M. S., Davis, G. A., eds., Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution of central and eastern Asia: from continental assembly to intracontinental deformation. *Geological Society of America Memoir*, 194: 101—116. doi: 10.1130/0-8137-1194-0.101
- 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, J. F., Zhu, Q., Shao, J., et al., 2003. U-Pb age of monomineral zircon of Badaoka quartz-diorite in Inner Mongolia and its significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 33(4): 430—433 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. H., Gao, S., Ge, W. C., et al., 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an range, northeastern China: implications for subduction-induced delamination. *Chemical Geology*, 276(3—4): 144—165. doi: 10.1016/j.chemgeo.2010.05.013
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Song, B., et al., 2009a. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: geochronology, petrogenesis, and tectonic implications. *Geological Society of America Bulletin*, 121(1—2): 181—200. doi: 10.1130/B26157.1
- Zhang, Y. Q., Xu, L. Q., Kang, X. L., et al., 2009b. Age dating of alkali granite in Jingesitai area of Dong Ujimqin banner, Inner Mongolia, and its significance. *Geology in China*, 36(5): 988—995 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. H., Peng, Y. J., Ou, X. X., 2000. Some issues on the Permian strata in the Yanbin area, Jilin Province. *Jilin Geology*, 19(1): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Q., Han, J. G., Hu, F. X., 2002. Characteristics and tectonic significance of granites of Middle Triassic in Bayinnuorigong area, Inner Mongolia. *Geology of Inner Mongolia*, 4: 15—20 (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
- 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).
- Zonenshain, L. P., Kuzmin, M. I., Natapov, L. M., et al., 1990. Geology of the USSR: a plate-tectonics synthesis. American Geophysical Union, Geodynamic Monograph 21, Washington, D. C., 242.
- 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. doi: 10.1016/S0040-1951(99)00042-6

附中文参考文献

- 陈斌,赵国春,Wilde,S.,2001.内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义.地质论评,47(04): 361—367.
- 邓晋福,苏尚国,刘翠,等,2006.关于华北克拉通燕山期岩石

- 圈减薄的机制和过程的讨论:是拆沉,还是热侵蚀和化学交代? 地学前缘,13(2):105—119.
- 郭锋,范蔚茗,李超文,等,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),39(5):569—579.
- 洪大卫,王式洸,谢锡林,等,2000. 兴蒙造山带正 ϵ (Nd,t) 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. 地学前缘,7(2):441—456.
- 蒋映德,邱华宁,肖慧娟,2006. 闪锌矿流体包裹体 Ar-Ar 定年研究进展. 矿物岩石地球化学通报,25(2):198—199.
- 李锦铁,2004. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变. 地质评论,50(3):304—322.
- 李锦铁,高立明,孙桂华,等,2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. 岩石学报,23(3):565—582.
- 李锦铁,牛宝贵,宋彪,等,1999. 长白山北段地壳的形成与演化. 北京:地质出版社,137.
- 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):1—8.
- 李益龙,周汉文,钟增球,等,2010. 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. 地球科学——中国地质大学学报,35(6):921—932.
- 李永安,孙东江,郑洁,1999. 新疆及周边古地磁研究与构造演化. 新疆地质,3:97—139.
- 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,张履桥,魏春景,等,2001. 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.
- 邵济安,1991. 中朝板块北缘中段地壳演化. 北京:北京大学出版社,136.
- 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.
- 宋明春,1998. 胶南造山带变质岩系中角闪石的初步研究. 山东地质,14(4):25—30.
- 唐克东,1992. 中朝板块北侧褶皱带构造演化及成矿规律. 北京:北京大学出版社,277.
- 汤文豪,张志诚,李建锋,等,2010. 内蒙古苏尼特右旗查干诺尔石炭系本巴图组火山岩地球化学特征及其地质意义. 北京大学学报(自然科学版),3:62—71.
- 王冬兵,刘勇胜,宗克清,等,2009. 内蒙古林西早中生代 O 型高镁埃达克质安山岩的发现及其意义. 地质科技情报,28(6):32—38.
- 王惠初,赵凤清,李惠民,等,2007b. 冀北闪长质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄:晚古生代岩浆弧的地质记录. 岩石学报,23(3):597—604.
- 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,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,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.
- 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.
- 袁桂邦,王惠初,2006. 内蒙古武川西北部早二叠世岩浆活动及其构造意义. 地质调查与研究,29(4):303—310.
- 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.
- 张炯飞,朱群,邵军,等,2003. 内蒙古八道卡石英闪长岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版),33(4):430—433.
- 张永焕,彭玉鲸,欧祥喜,2000. 关于吉林省延边地区二叠纪地层的思考. 吉林地质,19(1):1—12.
- 张永清,韩建刚,胡凤翔,2002. 内蒙古阿拉善盟巴音诺日公地区中三叠世花岗岩特征及构造意义. 内蒙古地质,4:15—20.
- 张玉清,许立权,康小龙,等,2009b. 内蒙古东乌珠穆沁旗京格斯台碱性花岗岩年龄及意义. 中国地质,36(5):988—995.
- 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.
- 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.