https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.027



大兴安岭北段扎兰屯地区斜长角闪岩年代学、地球化 学和Hf同位素特征及其构造意义

钱程1,汪岩1,陆露2,3,秦涛1,李林川1,崔天日1,陈会军1,杨柳1

1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心,辽宁沈阳110034

2. 沈阳师范大学古生物学院,辽宁沈阳110034

3. 自然资源部东北亚古生物演化重点实验室,辽宁沈阳110034

摘 要: 扎兰屯地区位于贺根山一黑河构造带中段,发育叠加韧性变形的晚古生代岩浆岩,可较好地记录这一时期的构造演化历史,但其研究程度较低.在野外调查基础上,对扎兰屯头道沟花岗质糜棱岩中的斜长角闪岩构造透镜体进行年代学和地球化学研究,探讨其成岩、变质及构造意义.头道沟斜长角闪岩原岩为玄武安山岩,锆石 LA-ICP-MS U-Pb年龄为373.0±2.6 Ma,相当于大民山组火山岩.该岩石属钠质岩石,富集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损高场强元素,锆石原位 є_{нf}(t)为+5.39~+10.06,类似兴安岛弧的 Hf 同位素特征.上述特征暗示其原岩可能起源于蚀变洋壳流体交代亏损地幔演化而来的年轻下地壳,形成于板块消减带之上的前弧盆地.晚泥盆世在额尔古纳一兴安地块东南缘发育弧后、弧间和弧前盆地.斜长角闪岩变质年龄为~241.5±9.6 Ma,该变质可能与天山一兴蒙造山带演化晚期的伸展作用有关.

关键词:斜长角闪岩;锆石U-Pb年代学;Hf同位素;贺根山一黑河构造带;岩石学.

中图分类号: P581; P595 **文章编号:** 1000-2383(2019)10-3193-16 **收稿日期:** 2019-02-21

Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopic Composition of Amphibolite from Zhalantun Region in Northern Great Xing ' an Range and Its Tectonic Significance

Qian Cheng¹, Wang Yan¹, Lu Lu^{2,3}, Qin Tao¹, Li Linchuan¹, Cui Tianri¹, Chen Huijun¹, Yang Liu¹

1. Shenyang Center of Geological Survey, China Geological Survey, Shenyang 110034, China

- 2. College of Paleontology, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China
- 3. Key Laboratory of Evolution of Past Life in Northeast Asia, Ministry of Natural Resources, Shenyang 110034, China

Abstract: The Late Paleozoic magmatic rocks with ductile deformation occurred in the Zhalantun region located in the middle of the Hegenshan-Heihe tectonic belt, which well record the tectonic evolution history of the Late Paleozoic, but the research degree is low. Through the field investigation, the geochronology and geochemistry of amphibolite lenticles from granitic mylonite in the Toudaogou, southern Zhalantun, are systematically studied, and the petrogenesis and tectonic setting of the amphibolite are discussed. It is found that the protolith of amphibolite is basaltic andesite, yielding an average zircon U-Pb age of 373.0 ± 2.6 Ma which is equivalent to the volcanic rocks of Daminshan Group. The rocks belong to sodium series, which are enriched in light rare

引用格式:钱程,汪岩,陆露,等,2019.大兴安岭北段扎兰屯地区斜长角闪岩年代学、地球化学和Hf同位素特征及其构造意义.地球科学,44 (10):3193-3208.

基金项目:中国地质调查局项目(Nos.D20160048-01,DD20160345-17,DD20190039,1212011220435).

作者简介:钱程(1985-),男,硕士,工程师,构造地质学专业,主要从事区域地质研究.ORCID:0000-0002-1626-1737.E-mail:qch1985123@ 163.com

earth elements, large ion lithophile elements, but are depleted in high field strength elements. The zircon $\varepsilon_{Hf}(t)$ values of the amphibolite range from ± 5.39 to ± 10.06 , similar to the features of the Xing' an island arc, suggesting that the protolith of amphibolite may be derived from the melting of a juvenile lower crust originating from depleted mantle which were modified by fluids stemmed from altered ocean crust, and supposedly formed in an fore arc basin above the subduction zone. In the Late Devonian, back-arc basin, inter-arc basin and fore-arc basin ocurred in the southeast region of Erguan-Xing' an block. The amphibolite and its surrounding granitic mylonite experienced multistage metamorphic deformation. The amphibolite yielded a metamorphic age of about 241.5 \pm 9.6 Ma, which may be related to the extension of the late evolution of the Tianshan-Xingmeng orogenic belt.

Key words: amphibolite; zircon U-Pb geochronology; Hf isotopic composition; Hegenshan-Heihe suture belt; petrology.

中亚造山带夹持于西伯利亚板块、华北板块和 塔里木板块之间,是古生代大陆增生改造最为典型 的地区(Jahn et al., 2004),一直以来备受国内外学 者关注(图 1a).其形成与古亚洲洋的形成、演化和 闭合密切相关,主体是由俯冲作用形成的增生杂 岩、岩浆弧及夹杂其中的微陆块、洋底高原和洋岛 等构造单元构成(Windley et al., 2007).其东段被称 为兴蒙造山带,由若干微地块、岛弧及夹杂其间的 构造带或缝合带组成(图 1b),是研究造山带构造演 化的重要地区之一,中新生代受蒙古一鄂霍茨克洋 和古太平洋构造域叠加作用(Feng et al., 2015).

大兴安岭地处兴蒙造山带东部,南侧以西拉木 伦蛇绿岩带为界与华北板块北缘相接,主要由额尔 古纳地块、兴安岛弧、松嫩地块及塔源一喜桂图构 造带和二连一贺根山一黑河构造带组成(图1b)(洪 大卫等, 1994; Xu and Chen, 1997; Li, 2006; 葛文 春等,2007;潘桂棠等,2009;徐备等,2014; Feng et al., 2015; Chen et al., 2018). 沿塔源一喜桂图构 造带发育新元古代一早古生代蛇纹岩、变辉长岩、 辉石岩、蓝片岩等(李瑞山, 1991),近年来发现奥陶 纪后造山双峰式侵入岩,较为准确地限定该带为早 古生代早期额尔古纳地块和兴安岛弧的构造拼合 带(葛文春等, 2007; Feng et al., 2015). 而就二连-贺根山-黑河构造带而言,其构造属性和形成时限 争议极大.有学者将该构造带厘定为古亚洲洋的最 终闭合位置(洪大卫等, 1994),但更多学者将其厘 定为额尔古纳一兴安地块和松嫩地块的拼合位置 (唐克东, 1989;苏养正, 1996;孙德有等, 2000; Wu et al., 2002; Feng et al., 2015). 形成时限上也 存在很大争议,大体存在3种观点:(1)早古生代末, 如中晚志留世(唐克东, 1989)、晚志留世-早泥盆 世(Xu and Chen, 1997);(2)晚古生代,如泥盆纪 (Xu and Cheng, 1997; 徐备等, 2014)、晚泥盆世 (苏养正,1996)、晚泥盆世-早石炭世(洪大卫等,

1994)、早石炭世晚期(赵芝等, 2010; Zhang *et al.*, 2015)、前二叠纪(孙德有等, 2000; Li *et al.*, 2016)、 晚石炭世-早二叠世(孙凡婷等, 2018)等;(3)中生 代初,如三叠纪(Chen *et al.*, 2009).

目前,学者们对二连一贺根山一黑河构造带西 南段(二连一贺根山段)和东北段(嫩江一黑河段) 的物质组成及接触关系、岩石成因及构造背景、生 物地层及年代格架等进行了大量的研究(赵芝等, 2010;付俊彧等,2015;Zhang et al.,2015;赵院冬 等,2015).而对该构造带中段(扎兰屯一霍林郭勒 段)的资料报道较少.近年来,笔者调查发现扎兰屯 地区发育晚古生代岩浆岩,可较好地记录这一时期 的构造演化历史,但其研究程度较低.本文对扎兰 屯市南部头道沟花岗质糜棱岩中的斜长角闪岩构 造透镜体进行年代学和地球化学研究,分析其原岩 成岩时代,探讨该原岩的岩石成因,厘定其变质时 代,并结合区域资料,探究其成岩、变质等所揭示的 大地构造意义,为兴蒙造山带的构造格局及演化历 史研究提供新材料.

1 区域地质背景及岩石学特征

研究区位于内蒙古自治区东北部扎兰屯市南 部地区,属大兴安岭东坡与松辽平原过渡地带.大 地构造上,研究区属兴蒙造山带、大兴安岭弧盆系、 二连一贺根山一黑河构造带中段,是额尔古纳一兴 安地块和松嫩地块拼接的重要区段(图1b).

额尔古纳一兴安地块为早古生代早期额尔古 纳地块和兴安岛弧拼合增生而成(葛文春等, 2007; Feng et al., 2015).额尔古纳地块西南侧与蒙 古国东北部的伊伦达瓦(Ereendavaa)地块相连,以 发生角闪岩相的兴华渡口群和新太古代一古元古 代花岗质片麻岩和黑云斜长片麻岩(邵军等, 2015) 为基底,经历了中新元古代地壳增生(葛文春等, 2007),被大面积分布的晚古生代浅海相一海陆交



图1研究区地质简图 Fig.1 Geological sketch map of the study area

a. 中亚地区构造简图(据 Jahn et al., 2004 修改); b. 中国东北地区构造简图(据潘桂棠等, 2009 修改); c. 扎兰屯南部地区地质简图. F1. 塔 源一喜桂图构造带; F2. 贺根山一黑河构造带; F3. 西拉沐伦一长春构造带; F4. 赤峰一开源断裂带; F5. 嘉荫一牡丹江构造带

互相火山一碎屑沉积和中生代陆相火山一碎屑沉 积覆盖,并伴有强烈的晚古生代一中生代花岗质岩 浆活动.兴安岛弧位于额尔古纳地块东南侧,南西 与蒙古国南部 Mandalovoo 和 Gurvansayhan 地体相 连,由北向南可划分为多宝山岛弧、扎兰屯岛弧、博 客图岛弧和东乌旗岛弧等,其以发生绿片岩相的新 开岭岩群和倭勒根岩群为基底,经历了新元古代一 早古生代地壳增生(Han *et al.*, 2015; 王照元等, 2018),早古生代一石炭纪发育岛弧岩浆活动(葛文 春等,2007;赵芝等,2010;付俊彧等,2015;Wu et al.,2015;张渝金等,2016;Chen et al.,2018;李良等,2018),被大面积分布的晚石炭世一早二叠世海陆交互相和陆相火山一碎屑沉积、晚二叠世陆相碎屑沉积及中生代火山一碎屑沉积覆盖,并伴有强烈的花岗质岩浆活动(中国地质调查局沈阳地质调查中心,2016,大兴安岭北段关键地区区域地质调查报告).

松嫩地块位于额尔古纳一兴安地块东南侧,东

侧以牡丹江构造带为界与佳木斯地块相接、北侧接 蒙古一鄂霍茨克中生代造山带、南侧以吉中造山带 与华北板块北侧的弧盆系相隔,其主体包括小兴安 岭岩块、张广才岭岩块、松辽盆地北侧覆盖区及部 分南大兴安岭地区.松嫩地块以发生角闪岩相的东 风山群(权京玉等,2013)和新太古代一古元古代花 岗质片麻岩和斜长角闪岩(钱程等,2018a)为基底, 早古生代发育浅海相陆缘碎屑沉积(权京玉等, 2013),晚古生代受古亚洲洋闭合影响在地块的南 缘和西缘发育陆缘弧岩浆活动,中新生代上叠火山 盆地,并伴有强烈的晚三叠世一早白垩世花岗质岩 浆活动.

研究区内出露的地层主要为中生代火山一沉 积地层,局部出露晚古生代地层(图1c).晚古生代 地层主要包括:上石炭统宝力高庙组陆相中酸性火 山岩和正常沉积碎屑岩、上石炭统一下二叠统格根 敖包组海陆交互相安山质火山岩和正常碎屑岩夹 灰岩透镜体、下二叠统大石寨组海相中酸性火山岩 夹正常碎屑岩、中二叠统哲斯组浅海相正常碎屑岩 夹灰岩透镜体、上二叠统林西组湖相黑灰色为主的 砂板岩.区内侵入岩分布面积较大,主要为花岗质 岩石(图1c),成岩时代可划分为泥盆纪-早石炭 世、晚石炭世、早二叠世、晚三叠世和早白垩世等5 个时期(中国地质调查局沈阳地质调查中心,2012, 内蒙古1:50 000大旗等4幅区域地质调查报告).泥 盆纪一早石炭世的花岗质岩石普遍叠加不同程度 的韧性变形,被二叠纪之后的地质体肢解或覆盖, 其内夹杂有斜长角闪岩、黑云角闪斜长片岩、变玄 武岩、绿泥斜长片岩、绿帘黑云斜长片岩等构造透 镜体,构造面理与糜棱页理一致.

本文所研究的斜长角闪岩产于头道沟花岗质 糜棱岩中.采样点(D704)位于扎兰屯市中和镇头道 沟村,经纬度为N47°41′45″、E122°32′50.5″,斜长角 闪岩呈构造透镜体状产出于花岗质糜棱岩中,出露 宽度约8~10m,走向延伸约15m.花岗质糜棱岩面 理产状150°∠50°、拉伸线理185°∠35°,S-C组构发 育、呈右行运动学特征,原岩结晶时代为晚泥盆世 末一早石炭世初(约为356~361 Ma);斜长角闪岩 发育条带状构造,面理产状165°∠45°(图2a).本次 在斜长角闪岩中采集薄片样品及配套的锆石U-Pb 测年和Hf同位素分析样品1套、采集主微量地球化 学分析样品8套.

头道沟斜长角闪岩(D704b)风化面颜色为灰黄 色、新鲜面颜色为灰绿色,条带状构造,粒状变晶结 构,岩石主要由辉石(20%±)、角闪石(40%±)及 斜长石(40%±)组成.辉石呈淡绿色,他形粒状或 不完整八边形粒状,与角闪石镶嵌共生,粒径为 0.05~0.25 mm;角闪石呈黄绿色,显著多色性,半自 形板柱状、宽板状,表面新鲜洁净,长轴略定向,粒 径为0.15~0.70 mm;斜长石呈半自形粒状,聚片双 晶带较宽,表面泥化、绢云母化,粒径为0.05~0.20 mm; 共生矿物组合为Hb+Cpx+Pl(图2b).本套岩石周 边出露大量黑云角闪斜长片岩、变玄武岩、绿泥斜 长片岩等构造透镜体,他们可能为同一套中基性火 山岩地层变质而来,岩相上本套斜长角闪岩矿物粒 度较细且均匀,推测其原岩为中基性火山岩,变质 程度达低角闪岩相.

2 锆石 U-Pb 测年

2.1 分析方法

样品的锆石挑选由河北省廊坊市宇恒矿岩技 术服务有限公司完成.锆石U-Pb同位素分析在中 国地质科学院地质所深地动力学实验室完成.对待



图 2 扎兰屯市头道沟斜长角闪岩岩貌(a)及显微岩石学照片(b) Fig.2 The field and microscopic characteristics of the amphibolite from Toudaogou in Zhalantun

测样品的锆石与标样环氧树胶浇铸,制成薄片、抛 光,然后对其进行反射光、透射光和阴极发光(CL) 图像的采集,以确定锆石的内部结构和成因.锆石 U-Pb定年工作所用的MC-ICP-MS为美国Thermo Fisher公司最新一代Neptune Plus型多接收等离子 体质谱仪.采用的激光剥蚀系统为美国Coherent公 司生产的GeoLasPro 193nm.激光剥蚀所用束斑直 径为30 µm,频率为10 Hz,能量密度为2.5 J/cm²,以 He为载气.结合锆石反射、透射照片,避开锆石内部 裂隙和包裹体.实验标样为91500,²⁰⁶Pb/²³⁸Pb年龄 的加权平均值误差为±1σ.本文样品锆石的LA-ICP-MS U-Pb分析结果见附表1.

2.2 锆石 U-Pb 年龄测试结果

本次测试样品(D704b)的锆石主体为半透明浅 褐色,粒度大小80~150 µm,长宽比约为2:1.该组 锆石具有较为一致的结构构造特征,呈现核边或核 幔构造,内部具有较大的锆石继承核,外侧普遍包 裹一宽约5~40 µm厚度不等的暗色环带,二者之间 隐约可见灰白色变质细边(图3).内部核较大,呈灰 白色-浅灰色,多为短柱状,晶面和锥体形态完好, 锆石阴极发光图像显示其发育明显的同心状、扇状 环带、韵律环带,锆石的Th/U比值>0.2,为岩浆锆 石;外侧变质环带颜色较深,韵律环带不发育,锆石 的Th/U比值<0.2,为变质增生边(图3).本次工作 对锆石的继承核和变质增生边均进行测试.

本次选择49颗不同特征的锆石进行测试分析, 测点共49个.其中点10、13、17、22、30、33、37等7个 数据存在Pb丢失偏离谐和曲线,其他42个数据落 到谐和曲线上,其²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄介于(237.5± 6.4)~(392.5±11.3) Ma(图4a).42个数据在谐和图 上分布呈现3个集中区:(1)39个数据,测点均位于 锆石核部, Th/U值为0.27~1.23, 206Pb/238U表面年 龄介于(357.4±7.1)~(392.5±11.3) Ma,加权平均 年龄为373.0±2.6 Ma, MSWD=1.03, 代表了一期 岩浆事件(图4b);(2)1个数据,测点均位于锆石核 部, Th/U值为0.94, 206 Pb/238U表面年龄为336.1± 5.9 Ma,该年龄可能与中高级变质岩采用LA-ICP-MS测试方法(束斑大、剥蚀深)得到核边的混合年 龄有关,实际意义不大;(3)2个数据,测点均位于锆 石变质增生边上, Th/U 值为 <0.01 和 0.16, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄为 237.5±6.4 Ma 和 247.0± 7.5 Ma, 加权平均年龄为241.5±9.6 Ma, MSWD= 0.91,代表了样品的变质年龄.

3 岩石地球化学特征

3.1 分析方法

本文对配套的8件样品进行了主量、稀土及微量元素测试,测试结果见附表2.主量、稀土及微量 元素分析在国土资源部东北矿产资源监督检测中 心完成,整个过程均在无污染设备中进行,主量元



图 3 扎兰屯市头道沟斜长角闪岩锆石阴极发光CL图及U-Pb年龄

Fig.3 CL images and U-Pb data of zircons of the amphibolite from Toudaogou in Zhalantun



The zircon U-Pb concordia diagram (a) and ²⁰⁶Pb/²³⁸U weighted average histogram (b) of the amphibolite from Fig.4 Toudaogou in Zhalantun

素采用X射线荧光光谱法(XRF),其中FeO分析采 用的是重铬酸钾容量法,分析精度优于1%~5%; 稀土元素和微量元素采用电感耦合等离子质谱法 (ICP-MS)完成,分析精度和准确度优于5%~10%. 锆石微区原位 Hf 同位素分析在西北大学大陆动力 学国家重点实验室进行,激光剥蚀系统是193nm准 分子激光剥蚀系统(RESOlutionM-50, ASI),激光 能量密度为 $6 J/cm^2$, 频率为5 Hz, 斑束为 $43 \mu m$, Hf 同位素分析采用多接收等离子体质谱(Nu Plasma Ⅱ MC-ICPMS),分析过程采用国际标准锆石样品 91500和Mudtank作为监控样品,测试结果见表1.

3.2 主量元素特征

本套斜长角闪岩为中基性火山岩经历低角闪

岩相变质作用的产物,其样品的烧失量(LOI)较小 (1.26%~1.85%),具可靠性和代表性.本套岩石主 量元素含量及特征较为一致,均具有较低的SiO₂、 TiO₂、MnO 和 P₂O₅, 分 别 为 50.40%~53.64%、 $0.98\% \sim 1.08\%$, $0.16\% \sim 0.19\%$ 和 $0.63\% \sim 0.66\%$; 中等的 FeO^T和 MgO, 分别为 7.69%~8.50%和 4.95%~5.85%;较高的Al₂O₃,Na₂O+K₂O和CaO, 分别为 15.22%~16.21%、5.13%~6.13% 和 7.98%~11.03%;并具较高 Mg[#]和较低的 m/f,分别 为 52.16~56.60 和 0.76~0.91, 具体见附表 2. 在 $K_2O+Na_2O-SiO_2图(图 5a)中样品落人玄武质粗面$ 安山岩和粗面玄武岩区,在Zr/TiO2*0.000 1-Nb/Y 图(图 5b)中样品落入安山岩和玄武安山岩区.样品

	Table 1 The results of zircon Lu-Hf isotopic analysis of the amphibolite from Toudaogou in Zhalantun									
测点号	年龄(Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	$^{176}{ m Hf}/^{177}{ m Hf}$	$I_{\rm Hf}$	$\epsilon_{\rm Hf}(0)$	$\varepsilon_{\rm Hf}(t)$	$T_{\rm DM1}({\rm Ma})$	$T_{\rm DM2(cc)}({\rm Ma})$	$f_{ m Lu/Hf}$
1		0.038 875	0.001 321	0.282 707	0.282 710	-2.2	5.69	774	928	-0.96
2		0.028 970	0.001 021	0.282 716	0.282 719	-1.9	6.09	755	906	-0.97
3		0.030 143	0.001 044	0.282 754	0.282 758	-0.5	7.43	702	831	-0.97
4		0.038 843	0.001 281	0.282 726	0.282 729	-1.5	6.37	746	890	-0.96
5		0.027 357	0.000 956	0.282 723	0.282 726	-1.6	6.35	744	891	-0.97
6	272 0	0.046 786	0.001 575	0.282 719	0.282 722	-1.8	6.05	762	908	-0.95
7	373.0	0.035 180	0.001 199	0.282 707	0.282 710	-2.2	5.72	772	926	-0.96
8		0.029 675	0.001 025	0.282 737	0.282 741	-1.1	6.85	725	863	-0.97
9		0.054 850	0.001 822	0.282 730	0.282 733	-1.4	6.39	751	889	-0.95
10		0.024 972	0.000 864	0.282 783	0.282 787	0.5	8.51	657	770	-0.97
11		0.029 171	0.001 004	0.282 828	0.282 832	2.1	10.06	596	684	-0.97
12		0.071 996	0.002 355	0.282 705	0.282 709	-2.2	5.39	798	945	-0.93

表1	扎兰中	自市头道沟	斜长角	争闪岩	锆石 Lu	Ⅰ−Hf同位計	素测试结	課	





的 σ 为 3.23~3.67,属碱性和亚碱性过渡的区域,而 在 Zr/TiO₂*0.000 1-Nb/Y 图中(图 5b)样品属亚碱 性系列,考虑到变质作用可能对 Na₂O 和 K₂O 产生 影响,因此将本套样品岩石系列归属于亚碱性系 列,在 FeO^T/MgO-SiO₂图(图 5c)中样品落入拉斑系 列与钙碱性系列的过渡区域,Na₂O/K₂O 为 2.04~ 2.74,属偏钠质岩石.结合岩相学分析,认为本套斜 长角闪岩的原岩为玄武安山岩,属钠质兼具拉斑性 和钙碱性特征.

3.3 稀土、微量元素特征

本套斜长角闪岩变质程度达低角闪岩相,可能 会对一些较为活泼元素(如Cs、Rb等)产生影响,因 此在相关分析和讨论过程中将避免使用这些元素, 主要讨论受变质作用影响较小的REE和高场强元 素等.

本套斜长角闪岩的总稀土含量较高(∑REE= 199.90×10⁻⁶~341.78×10⁻⁶),轻稀土相对富集 $(LREE=177.44 \times 10^{-6} \sim 312.45 \times 10^{-6})$ 、重稀土相 对亏损(HREE=21.43 × 10⁻⁶ ~ 29.32 × 10⁻⁶),轻重 稀土分馏较强(LREE/HREE=7.90~10.66、La_N/ Yb_N=8.27~14.12), δ Ce异常不明显, δ Eu呈负异常 (0.63~0.91),稀土元素曲线呈右倾型,相似于OIB 配分曲线(图 6a).样品的微量元素原始地幔标准化 蛛网图显示,相对原始地幔整体富集,大离子亲石 元素(LILE)相对富集、高场强元素(HFSE)相对亏 损,与OIB相比,富集Rb、U、Nd,强烈亏损Nb、Ta、 Zr、Hf、Ti(图 6b).

3.4 锆石 Hf 同位素特征

在测年工作基础上,对斜长角闪岩(D704b)进行错石原位Lu-Hf同位素测定.测试的12颗岩浆锆石原位微区Hf同位素特征为:¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf介于0.024 972~0.071 996(平均为0.038 068)、¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf介于0.000 956~0.002 355(平均为0.001 289)、¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf介于0.282 705~0.282 828



Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram(b) of the amphibolite from Toudaogou in Zhalantun





a. ε_{Hf}(t)-t图解(灰色区据Yang et al., 2006; 虚线区据Han et al., 2015); b. ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf-t图解; c. ε_{Hf}(t)-t图解

(平均为0.282 736).以其原岩形成年龄373.0 Ma计 算锆石初始Hf同位素值($\varepsilon_{Hf}(t)$)介于+5.39~+ 10.06(平均为+6.74),位于亏损地幔演化线和球粒 陨石演化线之间(图7);Hf同位素单阶段模式年龄 (T_{DM1})介于596~798 Ma(平均为731 Ma),二阶段 模式年龄(T_{DM2})介于684~945 Ma(平均为 869 Ma),与兴蒙造山带中兴安岛弧显生宙岩浆锆 石原位微区Hf同位素特征一致(图7a); $f_{Lu/Hf}$ 介于-0.93~-0.97(平均为-0.96),变化范围较 小,暗示岩浆源区相对均一.

4 讨论

4.1 年代格架

如前已述,样品的锆石具有核幔构造,核幔具 有不同的成因结构和测年数据.核部表现为岩浆锆 石特征,获得 39个²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄的加权平均 值为 373.0±2.6 Ma,可代表了斜长角闪岩原岩的结 晶年龄,属晚泥盆世.幔部表现为变质边特征,获得 2个²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄的加权平均值为 241.5±9.6 Ma,可能代表了样品的变质年龄,属中晚三叠世.

兴安岛弧发育上泥盆统大民山组海相中基 性一酸性火山岩、火山碎屑岩及碎屑岩、碳酸盐岩 及硅质岩、放射虫硅质岩等沉积建造.大民山组是 1959年在扎敦河大民山地区建组,分为下、上大民 山组,依据其内的生物化石将其时代分别归属于晚 泥盆世弗拉斯期和法门期;1981年黑龙江省区调二 队在该地区开展地质调查,沿用下、上大民山组,并 确定二者为整合接触,并将下大民山组的时代归属 为中泥盆世晚期一晚泥盆世早期;1996年内蒙古岩 石地层清理,将原霍博山组、下大民山组和上大民 山组统一归并为大民山组,时代归属为中晚泥盆世. 近年来,学者在扎兰屯市跟头河大民山组中采集到 大量珊瑚、三叶虫、腹足类、苔藓虫、海百合茎等中 上泥盆统中的常见分子,并在安山岩中获得锆石U-Pb年龄为362.2 Ma(张渝金等, 2016),在牙克石免 渡河大民山组玄武岩中获得锆石U-Pb年龄为 373.2 Ma(赵芝等, 2010).本套斜长角闪岩原岩为 玄武安山岩,获得原岩成岩年龄为373.0±2.6 Ma (锆石U-Pb年龄),相当于区域上大民山组火山岩.

本套斜长角闪岩呈构造透镜体状产于头道沟 花岗质糜棱岩中,笔者在斜长角闪岩周围的花岗质 糜棱岩中获得2个锆石U-Pb年龄(356.1 Ma和 360.5 Ma),暗示花岗质糜棱岩原岩形成于晚泥盆世 晚期一早石炭世早期,略晚于斜长角闪岩原岩的成 岩时代.斜长角闪岩和花岗质糜棱岩具有相似的变 质变形特征,二者的构造面理及斜长角闪岩构造透 镜体产状一致,变质程度均可达到绿片岩一低角闪 岩相,因此推测二者可能经历了相同的变质变形作 用.扎兰屯市牤牛沟花岗质糜棱岩Rb-Sr年代学研 究显示其变形年龄为173 Ma(黎广荣等, 2006),扎 兰屯地区花岗质糜棱岩原岩年代学研究及四分村 花岗质糜棱岩中未变形的花岗岩岩枝年代学分析 认为其变形发生于308 Ma之后、290 Ma之前(钱程 等, 2018b),本次在头道沟斜长角闪岩中获得 241.5±9.6 Ma变质年龄.综上,扎兰屯地区斜长角 闪岩及同变形的花岗质糜棱岩经历了多期韧性变 形,变形时代为晚石炭世-早二叠世(308~290 Ma)、中晚三叠世(~241.5±9.6 Ma)和中侏罗世(~ 173 Ma)等.

4.2 岩石成因

前人对大民山组进行了大量研究,主要有以下

几种观点:(1)双重成因模式,即基性和中酸性火山 岩具有不同的成因模式,基性火山岩为拉张背景的 产物,以碱性和拉斑玄武岩为特征,为大陆弧后拉 张岩石成因(祝新友和刘国平, 1995)或陆间洋盆伸 展岩石成因(张渝金等, 2016),中酸性火山岩挤压 背景的产物,以岛弧钙碱性火山岩为特征,为俯冲 带火山岩成因(祝新友和刘国平, 1995;张渝金等, 2016);(2)单成因模式,主要包括大民山裂陷槽即 裂谷岩石成因(苏养正, 1996)、弧后盆地火山岩成 因(许文良等,1999)、活动大陆边缘岩石成因(赵芝 等,2010).张渝金等(2016)认为大民山组基性火山 岩为陆间洋盆伸展背景下具OIB特征的软流圈地 幔低程度部分熔融的产物,而赵芝等(2010)认为大 民山组中基性-酸性火山岩均为活动大陆边缘背 景下俯冲板片流体交代的亏损地幔楔部分熔融的 产物.此外,学者对兴安岛弧泥盆纪一石炭纪的基 性侵入也进行研究,主要有以下几种认识:(1)洋陆 俯冲背景下消减洋壳脱水促发地幔楔部分熔融(周 长勇等,2005);(2)碰撞伸展背景下软流圈上涌派 生流体交代的次大陆岩石圈部分熔融(Feng et al., 2015):(3)熔体-流体交代作用的富集地幔低程度 部分熔融(孙凡婷等, 2018).与大民山组基性火山 岩相比,本套斜长角闪岩主量元素特征和岩石系列 相似于免渡河大陆弧火山岩(赵芝等, 2010),Hf同 位素小于免渡河火山岩(赵芝等,2010),稀土和微 量元素特征相似于跟头河 OIB 火山岩(张渝金等, 2016),不同之处在于本套岩石亏损Nb、Ta、Zr、Hf、 Ti等高场强元素.与石炭纪中基性侵入岩相比,岩 石系列和Nb、Ta、Zr、Hf、Ti等元素的亏损特征相似 于塔源辉长岩(周长勇等, 2005; Feng et al., 2015) 和小奎勒河中基性侵入岩(孙凡婷等, 2018),Hf同 位素与小奎勒河中基性侵入岩(孙凡婷等, 2018)相 近.综上,本套斜长角闪岩原岩(玄武安山岩)与兴 安岛弧同期基性岩具有相似的岩石成因.

头道沟斜长角闪岩具有较低的 SiO₂和 TiO₂,略高的 MgO、CaO、Mg[#],暗示其原岩不可能来源于地壳或存在大量的大陆地壳物质参与.本套岩石的 Sm/Nd值(0.20~0.21)略高于地壳平均值、接近下地壳平均值,Th/Ce、La/Sm和 Th/La 比值(分别为 0.04~0.07、3.27~3.48和 0.09~0.14)略低于地壳平均值、接近下地壳平均值,Zr、Hf 亏损,不同于受地壳混染的后 Zr、Hf 正异常特征(Feng *et al.*, 2015),暗示其原岩性质相似于玄武质下地壳、在成岩过程

中地壳混染作用较弱或未发生混染.本套岩石普遍 存在负Eu异常,Mg、Fe、Ti含量较低,Ca、Al含量较高,La与∑REE、LREE、HREE、LREE/HREE和 La/Y呈正相关关系,La/Sm比值相对稳定,指示其 原岩在成岩过程中存在镁铁质矿物、钛铁氧化物和 斜长石等结晶分异作用.综上,本套岩石原岩(玄武 安山岩)属钠质、镁铁质、亚碱性系列岩石,兼具拉 斑性和钙碱性特征,性质相似于玄武质下地壳,在 成岩过程中经历了一定程度的结晶分异,地壳混染 程度较弱或未发生混染.

本套岩石 Mg[#](53.71~56.6)、V(240×10⁻⁶~ 303×10^{-6}) , Co $(24.3 \times 10^{-6} \sim 36.8 \times 10^{-6})$, Ni $(33.2 \times 10^{-6} \sim 54.4 \times 10^{-6})$, Cr $(65.4 \times 10^{-6} \sim 71.8 \times 10^{-6})$ 10⁻⁶)明显低于原始地幔派生岩浆.其LILE(如Th、 U、K)和LREE富集,轻重稀土分馏,Nb、Ta、Ti亏 损,La/Ta比值(44.46~142.73)高,显示该岩石原岩 形成于大洋俯冲背景,岩石成因可能与俯冲流体或 熔体交代岩石圈地幔(周长勇等,2005;赵芝等, 2010; Feng et al., 2015)、俯冲流体或熔体交代的富 集地幔低程度部分熔融(孙凡婷等, 2018)或地幔柱 与亏损上地幔相互作用(Donnelly et al., 2004)等有 关.本套岩石具较低的Sm/Th和Nb/Th(分别为 2.18~3.43 和 1.36~2.41), 较高的 Th/Y、Ba/Nb 和 Ba/Th (分别为0.11~0.16、42.38~70.48和90.74~ 124.59),暗示源区受到俯冲板片熔体或流体的交代 作用.在Th/Zr-Nb/Zr图中,样品落入熔体交代和 流体交代之间的区域(图8a);在Ba/Zr-Th/Zr图中, 样品落入蚀变洋壳流体区域,明显不同于地壳沉积 物加入特征(图 8b).在La/Sm-Sm/Yb和La/Yb-Zr/Nb有关的两种地幔部分熔融程度演化曲线中, 样品落入亏损地幔和原始地幔的石榴石二辉橄榄 岩演化线之间(图 8c,8d),部分熔融程度较低(约 5%~10%)(图8c),明显不同于富集地幔和OIB源 区特征,这与岩石高Al₂O₃、Sr和Sr/Y比值所指示 的石榴子石残留相源区特征相似. 锆石原位 ɛнí(t) 和Hf同位素位于亏损地幔演化线和球粒陨石演化 线之间(图 7a,7b),单阶段模式年龄(T_{DMI} =596~ 798 Ma,平均为731 Ma)明显老于角闪岩原岩的结 晶年龄(373.0 Ma),暗示本套岩石原岩源区可能为 亏损地幔或亏损地幔演化而来的年轻地壳,在ε_{Hf}(t)t图解(图7a,7c)中测点落入兴蒙造山带的兴安岛弧 区、分布于古生代演化线和底侵下地壳演化线之 间,明显区别于亏损地幔演化线.综上论述,本套岩



图 8 扎兰屯市头道沟斜长角闪岩原岩成因判别图解

Fig. 8 Petrogenesis discrimination diagrams of the amphibolite from Toudaogou in Zhalantun a.Nb/Zr-Th/Zr图(据 Ben Othman *et al.*, 1989); b.Ba/Zr-Th/Zr图(据 Ishizuka *et al.*, 2003); c.Sm/Yb-La/Sm图(据 Aldanmaz *et al.*, 2000); d. La/Yb-Zr/Nb图(据 Aldanmaz *et al.*, 2006); DM. 亏损地幔; N-MORB. 正常大洋中脊地幔; PM. 原始地幔; E-MORB. 富集地 幔; MORB. 洋中脊玄武岩; OIB. 洋岛玄武岩

石原岩(玄武安山岩)的源区不具有 PM、N-MORB、 E-MORB 和 OIB 源区特征;其较低的 La/Sm、较高 的 Sr/Y 和 Zr/Nb 及正 ɛ_{Hf}(t)特征,显示源区可能为 亏损地幔演化而来的年轻下地壳,受到蚀变洋壳流 体交代,在石榴石二辉橄榄岩演化区发生较低程度 的部分熔融(5%~10%),致使岩石富集 Rb、Ba、 Th、U等大离子亲石元素(LILE)相对富集、强烈亏 损 Nb、Ta、Ti等高场强元素(HFSE).

La/Sm

4.3 构造环境与地质意义

前人根据晚古生代区域构造演化,认为在额尔 古纳地块东南部地区存在一巨型活动陆缘带,大体 沿南蒙古-北大兴安地区呈北东向展布(Li,2006; 赵芝等,2010).大兴安岭北段晚泥盆世火山岩较为 发育,可能形成于弧后拉张盆地(祝新友和刘国平, 1995;许文良等,1999)、陆缘裂陷槽(苏养正, 1996)、大陆边缘弧(赵芝等,2010)或大洋板内(张 渝金等,2016)等背景.扎兰屯市头道沟斜长角闪岩 为玄武安山岩变质而来,地球化学显示俯冲带火山 岩特征,其 $\epsilon_{\rm HI}(t)$ 为+5.39~+10.06、单阶段模式年 龄(T_{DMI})为596~798 Ma,与兴安岛弧北段小奎勒 河中基性侵入岩(孙凡婷等, 2018)一致,反映在新 元古代时期古亚洲洋地幔经历了大比例的玄武质 岩浆熔融和抽提作用,是兴安岛弧的重要增生阶 段,也是额尔古纳地块和兴安岛弧拼合增生的重要 时期(葛文春等,2007),暗示本套岩石原岩形成于 俯冲背景下的陆缘岩浆弧环境.在La/Nb-La图解 (图 9a)和Ti-Zr图解(图 9b)中均落入岛弧钙碱性玄 武岩区,在Th/Yb-Ta/Yb图解(图9c)中落入活动 大陆边缘(陆缘弧)区,支持了上述认识.但本套岩 石呈钠质,兼具拉斑性和钙碱性特征,在Zr/Y-Zr图 解(图略)中落入板内玄武岩区,亦显示洋壳板内玄 武岩的特征,同时本套岩石具高V低Ti的特征,Ti/ V值为20.5~25.9,在V-Ti/1000图解(图8d)中落 入岛弧拉斑玄武岩和洋底玄武岩的叠置区,在Th/

Zr/Nb



图 9 扎兰屯市头道沟斜长角闪岩原岩构造环境判别图解

Fig. 9 Tectonic discrimination diagrams of the amphibolite from Toudaogou in Zhalantun a. La/Nb-La图; b. Ti-Zr图(据 Pearce *et al.*, 2003); c. Th/Yb-Ta/Yb图(据 Pearce, 2003); d. V-Ti/1 000图(据 Shervais, 1982); e. Th/ Hf-Ta/Hf图(据汪云亮等, 2001); f. Cr-Y图(据 Pearce, 2003); 在图 e中, I. 板块发散边缘 N-MORB 区, II. 板块汇聚边缘(II. 大洋岛 弧玄武岩区, II. 2. 陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区), III. 大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 T-MORB、E-MORB 区, IV. 大陆板内(IV. 1. 陆 内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区, IV. 2. 陆内裂谷碱性玄武岩区, IV. 3. 大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区), V. 地幔热柱玄武岩区;在其 他图中, CA. 钙碱性玄武岩, TH. 拉斑玄武岩, TR. 过渡性玄武岩, ALK. 碱性玄武岩, IAB. 岛弧玄武岩, IAT. 岛弧拉斑玄武岩, ICA. 岛 弧钙碱性玄武岩, SHO. 钾玄岩, MORB. 洋中脊玄武岩, WPB. 板内玄武岩, OIB. 洋岛玄武岩, BABB. 弧后盆地玄武岩, CFB. 大陆溢流 玄武岩

Hf-Ta/Hf图解(图8e)中落入陆缘火山弧玄武岩和 初始裂谷玄武岩区,在Cr-Y图解(图9f)中落入岛弧 拉斑玄武岩和板内玄武岩区,在TiO₂/10-MnO-P₂O₅ 图解(图略)中落入钙碱性玄武岩和洋岛碱性玄武 岩区,在Nb×2-Zr/4-Y图解(图略)中落入火山弧玄 武岩和板内拉斑玄武岩区,暗示头道沟斜长角闪岩 原岩产出的构造背景可能兼具岛弧和(洋壳)板内 背景.近年来学者在研究区南西侧的大石寨构造带

和北东侧的嫩江构造带中发现若干镁铁质一超镁 铁质岩和前弧火山岩岩石记录,大石寨构造带马鞍 山高镁安山岩与赞岐岩相似,形成于与俯冲消减有 关的构造背景(杨宾等, 2018),嫩江构造带哈达阳 镁铁质一超镁铁质岩形成于板块消减带之上的前 弧地区(付俊彧等, 2015),年代学研究显示俯冲消 减作用在早石炭世一晚泥盆世已经发生(付俊彧 等,2015:杨宾等,2018),大石寨构造带向北东可 与嫩江构造带相连共同作为兴安与松嫩锡林浩特 块体的构造边界,具有SSZ型蛇绿岩构造属性,蛇 绿岩的形成可延伸至早二叠世(Zhou et al., 2019), 综上晚泥盆世时期兴安地块与松嫩地块尚未拼合, 大石寨一爱民屯向北东至嫩江一黑河一带属兴安 地块东南侧俯冲前缘的前弧地区.结合区域资料及 前文岩石成因和源区特征的分析,本文认为扎兰屯 市头道沟斜长角闪岩原岩(玄武安山岩)与哈达阳 镁铁质一超镁铁质岩的形成背景相似,形成于板块 消减带之上的前弧盆地.

奥陶纪,古亚洲洋开始向额尔古纳一兴安地块 俯冲,在兴安岛弧上形成 NE 向展布的弧岩浆岩 (Wu et al., 2015).晚古生代初期,俯冲作用持续增 强,额尔古纳一兴安地块形成"北陆南洋"古地貌格 局(葛文春等,2007).泥盆纪时期,额尔古纳一兴安 地块与其东南侧的松嫩地块隔洋向望(李守军等, 2014; 张渝金等, 2016), 额尔古纳-兴安地块上(贺 根山一嫩江一线以西)海相化石以西伯利亚分子为 主, 而松嫩地块上(贺根山-嫩江-线以东)则以北 美和华南分子为主(李守军等, 2014).早石炭世中 晚期额尔古纳-兴安地块和松嫩地块发生拼合(赵 芝等, 2010; Feng et al., 2015),晚石炭世-二叠纪 沿贺根山-黑河构造带发育后碰撞岩浆活动(Feng et al., 2015).扎兰屯地区晚古生代早期存在3期花 岗质岩浆活动, I期(405~380 Ma)和Ⅱ期(365~ 350 Ma)为古亚洲洋向额尔古纳一兴安地块北西向 俯冲时期,Ⅲ期(335~325 Ma)为额尔古纳-兴安 地块与松嫩地块拼合后碰撞时期(钱程等,2018b). 晚泥盆世为Ⅰ和Ⅱ两个主俯冲期之间,俯冲作用相 对较弱,由额尔古纳一兴安地块内部向东南方向的 俯冲前缘地区出现弧后、弧间和弧前盆地,在扎敦 河一头道桥地区和乌奴耳地区出现大陆弧后新生 拉张盆地(祝新友和刘国平, 1995; 许文良等, 1999),在兴安岛弧内部出现弧间裂陷槽(苏养正, 1996),在扎兰屯跟头河地区出现与钙碱性岛弧火 山岩伴生的洋岛玄武岩(张渝金等,2016).该体制 下,在额尔古纳一兴安地块东南缘的前弧地区蚀变 洋壳流体交代亏损地幔演化而来的年轻下地壳,发 生前弧火山活动,形成头道沟斜长角闪岩原岩(玄 武安山岩).

本套斜长角闪岩及周围的扎兰屯地区花岗质 糜棱岩经历了前早二叠世、中晚三叠世和中侏罗世 等多期变质变形.其中前早二叠世(308~290 Ma) 变质变形是额尔古纳-兴安地块与松嫩地块碰撞 造山过程中侧向逃逸构造的产物(钱程等,2018b); 中侏罗世(~173 Ma)变质变形事件与漠河地区的 逆冲推覆带和黑河一嫩江一白城构造带(赵院冬 等; 2015)活动时限一致,可能与西太平洋板块向欧 亚大陆俯冲过程中俯冲角度变化及其导致的相关 地块或地体拼贴过程中的走滑调整有关 (Maruyama et al., 1997). 本次厘定的中晚三叠 世(~241.5±9.6 Ma)变质事件与东北地区A型 花岗岩侵位的时限(Wu et al., 2002)和北山-内蒙古南部一吉林南部东西向巨型后造山岩浆 岩带侵位的时限(李锦轶等,2007)一致,在大 兴安岭地区表现为韧性变形和构造岩浆作用 (马永非等, 2017),可能与古亚洲洋闭合后天 山一兴蒙巨型造山带演化晚期的伸展作用有关 (李锦轶等,2007).

5 结论

(1) 扎兰屯头道沟斜长角闪岩原岩为玄武安山 岩, 锆石 U-Pb 年龄为 373.0±2.6 Ma, 相当于区域上 泥盆统大民山组火山岩, 岩石成因研究显示其可能 来源于亏损地幔演化而来的年轻下地壳, 受到了蚀 变洋壳流体交代, 为板块消减带之上前弧盆地火山 活动的产物.

(2)晚古生代早期古亚洲洋向额尔古纳一兴安 地块俯冲消减,晚泥盆世期间在额尔古纳一兴安地 块东南缘发育弧后、弧间和弧前盆地.

(3)斜长角闪岩经历了中晚三叠世(~241.5± 9.6 Ma)变质作用,该作用可能与古亚洲洋闭合后天 山-兴蒙巨型造山带演化晚期的伸展作用有关.

致谢:测试分析过程中得到了中国地质科学院 地质所深地动力学实验室、西北大学大陆动力学国 家重点实验室、河北省廊坊市宇恒矿岩技术服务有 限公司和国土资源部东北矿产资源监督检测中心 等相关单位和个人的大力支持与帮助;审稿专家对 本文提出了宝贵的建议,更正了作者的一些研究思路,不仅提高了本文的质量,也让年轻科研人员获得了宝贵的工作经验;在此表示最诚挚的谢意!

附表见本刊官网(http://www.earth-science.net).

References

- Aldanmaz, E., Köprübaşı, N., Gürer, Ö., F., et al., 2006.
 Geochemical Constraints on the Cenozoic, OIB Type Alkaline Volcanic Rocks of NW Turkey: Implications for Mantle Sources and Melting Processes. *Lithos*, 86 (1-2): 50-76. https://doi. org/10.1016/j. lithos.2005.04.003
- Aldanmaz, E., Pearce, J. A., Thirlwall, M. F., et al., 2000.
 Petrogenetic Evolution of Late Cenozoic, Post-Collision
 Volcanism in Western Anatolia, Turkey. Journal of
 Volcanology and Geothermal Research, 102(1-2):
 67-95. https://doi. org/10.1016/s0377 0273(00)
 00182-7
- Ben Othman, D., White, W. M., Patchett, J., 1989. The Geochemistry of Marine Sediments, Island Arc Magma Genesis, and Recycling Crust-Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 94(1-2): 1-21. https://doi.org/ 10.1016/0012-821x(89)90079-4
- Chen, A.X., Zhou, D., Zhang, Q.K., et al., 2018. Age, Geochemistry, and Tectonic Implications of Dulaerqiao Granite, Inner Mongolia. *Journal of Earth Science*, 29 (1): 78-92. https://doi.org/10.1007/s12583 017 0817-6
- Chen, B., Jahn, B. M., Tian, W., 2009. Evolution of the Solonker Suture Zone: Constraints from Zircon U - Pb Ages, Hf Isotopic Ratios and Whole-Rock Nd-Sr Isotope Compositions of Subduction- and Collision-Related Magmas and Forearc Sediments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 245-257. https://doi.org/10.1016/j. jseaes.2008.05.007
- Chen, C., Lü, X.B., Wu, C.M., et al., 2018. Origin and Geodynamic Implications of Concealed Granite in Shadong Tungsten Deposit, Xinjiang, China: Zircon U-Pb Chronology, Geochemistry, and Sr - Nd - Hf Isotope Constraint. Journal of Earth Science, 29(1): 114-129. https://doi.org/10.1007/s12583-017-0808-7
- Donnelly, K. E., Goldstein, S. L., Langmuir, C. H., et al., 2004.Origin of Enriched Ocean Ridge Basalts and Implications for Mantle Dynamics. *Earth and Planetary Science Letters*, 226(3-4): 347-366. https://doi. org/ 10.1016/j.epsl.2004.07.019
- Feng, Z. Q., Jia, J., Liu, Y. J., et al., 2015. Geochronology

and Geochemistry of the Carboniferous Magmatism in the Northern Great Xing' an Range, NE China: Constraints on the Timing of Amalgamation of Xing' an and Songnen Blocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 411-426. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.12.017

- Fu, J. Y., Wang, Y., Na, F.C., et al., 2015. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of the Hadayang Mafic-Ultramafic Rocks in Inner Mongolia: Constraints on the Late Devonian Subduction of Nenjiang-Heihe Area, Northeast China. *Geology in China*, 42(6): 1740-1753(in Chinese with English abstract).
- Ge, W.C., Sui, Z.M., Wu, F.Y., et al., 2007.Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopic Characteristics and Their Implications of the Early Paleozoic Granites in the Northeastern Da Hinggan Mts., Northeastern China.*Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 423-440(in Chinese with English abstract).
- Han, G. Q., Liu, Y. J., Neubauer, F., et al., 2015. U-Pb Age and Hf Isotopic Data of Detrital Zircons from the Devonian and Carboniferous Sandstones in Yimin Area, NE China: New Evidences to the Collision Timing between the Xing' an and Erguna Blocks in Eastern Segment of Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 211-228. https://doi.org/10.1016/ j.jseaes.2014.08.006
- Hong, D. W., Huang, H. Z., Xiao, Y. J., et al., 1994. The Permian Alkaline Granites in Central Inner Mongolia and Their Geodynamic Significance. Acta Geologica Sinica, 68(3): 219-230 (in Chinese with Einglish abstract).
- Ishizuka, O., Taylor, R. N., Milton, J. A., et al., 2003. Fluid-Mantle Interaction in an Intra-Oceanic Arc: Constraints from High-Precision Pb Isotopes. *Earth and Planetary Science Letters*, 211(3-4): 221-236. https: //doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00201-2
- Jahn, B. M., Windley, B., Natal'in, B., et al., 2004. Phanerozoic Continental Growth in Central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 23(5): 599-603. https://doi.org/ 10.1016/s1367-9120(03)00124-x
- Li, G.R., Chi, X.G., Dong, C.Y., et al., 2006.Rb-Sr Isotopic Dating of Mylonitize Granite in Southeast Mid-Da Hinggan Mountains. *Journal of Jilin University* (*Earth Science Edition*), 36(Suppl.): 11-14(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. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.09.001
- Li, J.Y., Gao, L.M., Sun, G.H., et al., 2007. Shuangjingzi

Middle Triassic Syn-Collisional Crust-Derived Granite in the East Inner Mongolia and Its Constraint on the Timing of Collision between Siberian and Sino-Korean Paleo-Plates. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565-582 (in Chinese with English abstract).

- Li, L., Sun, F.Y., Li, B.L., et al., 2018.Geochemistry, Hf Isotopes and Petrogenesis of Biotite Granodiorites in the Mohe Area. *Earth Science*, 43(2): 417-435(in Chinese with English abstract).
- Li, R.S., 1991. Xinlin Ophiolite. *Heilongjiang Geoloy*, 2(1): 19-32 (in Chinese).
- Li, S., Wilde, S. A., Wang, T., et al., 2016. Latest Early Permian Granitic Magmatism in Southern Inner Mongolia, China: Implications for the Tectonic Evolution of the Southeastern Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 29(1): 168–180. https://doi.org/10.1016/j. gr.2014.11.006
- Li, S. J., Zhao, X. L., He, M., et al., 2014. The Structural Evolution and Pattern of the Late Paleozoic in Northeast China. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 33(4): 1-5(in Chinese with English abstract).
- Ma, Y.F., Liu, Y.J., Wen, Q.B., et al., 2017. Petrogenesis and Tectonic Settings of Volcanic Rocks from Late Triassic Hadataolegai Fm.at Central Part of Great Xing' an Range. *Earth Science*, 42(12): 2146-2173(in Chinese with English abstract).
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G., et al., 1997. Paleogeographic Maps of the Japanese Islands: Plate Tectonic Synthesis from 750 Ma to the Present. *The Island Arc*, 6 (1): 121-142. https://doi. org/10.1111/j. 1440-1738.1997.tb00043.x
- Pan, G.T., Xiao, Q. H., Lu, S. N., et al., 2009. Subdivision of Tectonic Units in China. *Geology in China*, 36(1): 1– 28 (in Chinese with Einglish abstract).
- Pearce, J. A., 2003. Supra-Subduction Zone Ophiolites: The Search for Modern Analogues. In: Pearce, J. A., ed., Special Paper 373: Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought. *Geological Society of America*, 269-293. https://doi.org/10.1130/0-8137-2373-6.269
- Qian, C., Chen, H. J., Lu, L., et al., 2018a. The Discovery of Neoarchean Granite in Longjiang Area, Heilongjiang Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(1): 27-36 (in Chinese with Einglish abstract).
- Qian, C., Lu, L., Qin, T., et al., 2018b. The Early Late-Paleozoic Granitic Magmatism in the Zalantun Region, Northern Great Xing ' an Range, NE China: Constraints on the Timing of Amalgamation of Er-

guna-Xing ' an and Songnen Blocks. *Acta Geologica Sinica*, 92(11): 2190-2214 (in Chinese with Einglish abstract).

- Quan, J.Y., Chi, X.G., Zhang, R., et al., 2013. LA-ICP-MS U-Pb Geochronology of Detrital Zircon from the Neoproterozoic Dongfengshan Group in Songnen Masiff and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 32(2): 353-364(in Chinese with English abstract).
- Shao, J., Li, Y. F., Zhou, Y. H., et al., 2015. Neo-Archean Magmatic Event in Erguna Massif of Northeast China: Evidence from the Zircon LA-ICP-MS Dating of the Geneissic Monzogranite from the Drill. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 45(2): 364-373(in Chinese with English abstract).
- Shervais, J. W., 1982. Ti-V Plots and the Petrogenesis of Modern and Ophiolitic Lavas. Earth and Planetary Science Letters, 59(1): 101-118. https://doi.org/10.1016/ 0012-821x(82)90120-0
- Su, Y.Z., 1996. Some Problems of Paleozoic Biostratigraphy in Northeastern China. *Jilin Geolgy*, 15(3-4): 66-69 (in Chinese with English abstract).
- Sun, D. Y., Wu, F. Y., Li, H.M., et al., 2000. The Age of Post-Orogenic A-Type Granite in the Northwest of Xiaoxing'an Mountains and Its Relationship with the Eastward Extension of the Soren-Heganshan-Zhalaite Collision Zone. *Chinese Science Bulletin*, 45(20): 2217-2222 (in Chinese).
- Sun, F. T., Liu, C., Qiu, D. M., et al., 2018. Petrogenesis and Geodynamic Significance of Intermediate-Basic Intrusive Rocks in Xiaokuile River, Eastern Slope of the Great Xing' an Range: Evidences of Zircon U-Pb Geochronology, Elements and Hf Isotope Geochemistry. *Journal of Jilin University*(*Earth Science Edition*), 48 (1): 145-164(in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345. https://doi. org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Tang, K. D., 1989. On Tectonic Development of the Fold Belts in the North Margin of Sino-Korean Platform.*Geo-science*, 3(2): 195-204(in Chinese with Einglish abstract).
- Wang, Y. L., Zhang, C. J., Xiu, S. Z., 2001. Th/Hf-Ta/Hf Identification of Tectonic Setting of Basalts. Acta Petrologica Sinca, 17(3): 413-421(in Chinese with Einglish abstract).
- Wang, Z. Y., Zheng, C. Q., Xiu, J. L., et al., 2018. Geo-

chemistry and Its Tectonic Implictions of Metamorphic Rocks of Jiageda Formation in Moerdaoga Area, Inner Mongolia. *Earth Science*, 43(1): 176-198 (in Chinese with Einglish abstract).

- 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*, 164(1): 31– 47. https://doi.org/10.1144/0016-76492006-022
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Li, H. M., et al., 2002. A-Type Granites in Northeastern China: Age and Geochemical Constraints on Their Petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1-2): 143-173. https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00018-9
- Wu, G., Chen, Y. C., Sun, F. Y., et al., 2015.Geochronology, Geochemistry, and Sr-Nd - Hf Isotopes of the Early Paleozoic Igneous Rocks in the Duobaoshan Area, NE China, and Their Geological Significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 229-250. https://doi.org/ 10.1016/j.jseaes.2014.07.031
- Xu, B., Chen, B., 1997. Framework and Evolution of the Middle Paleozoic Orogenic Belt between Siberian and North China Plates in Northern Inner Mongolia. Science in China (Series D), 40(5): 463-469. https://doi.org/ 10.1007/bf02877610
- Xu, B., Zhao, P., Bao, Q. Z., et al., 2014.Preliminary Study on the Pre-Mesozoic Tectonic Unit Division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB). Acta Petrologica Sinica, 30(7): 1841-1857 (in Chinese with Einglish abstract).
- Xu, W.L., Sun, D.Y., Yin, X.Y., 1999. Evolution of Hercynian Orogenic Belt in Daxing' anling Mt.: Evidence from Granitic Rocks. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29(4): 319-323(in Chinese with English abstract).
- Yang, B., Zhang, B., Zhang, Q. K., et al., 2018. Characteristics and Geological Significance of Early Carboniferous High-Mg Andesites in Ma'anshan Area, East Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 37(9): 1760-1771 (in Chinese with Einglish abstract).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Shao, J., et al., 2006.Constraints on the Timing of Uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China.*Earth and Planetary Science Letters*, 246(3/4): 336-352. https://doi. org/10.1016/j. epsl.2006.04.029
- Zhang, Y.J., Zhang, C., Wu, X.W., et al., 2016.Geochronology and Geochemistry of Late Paleozoic Marine Volcanic from the Zhalantun Area in Northern DaHinggan Mountains and Its Geological Significance.*Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2706-2720(in Chinese with English

abstract).

- Zhang, Z. C., Li, K., Li, J. F., et al., 2015. Geochronology and Geochemistry of the Eastern Erenhot Ophiolitic Complex: Implications for the Tectonic Evolution of the Inner Mongolia – Daxinganling Orogenic Belt. *Journal* of Asian Earth Sciences, 97: 279-293. https://doi.org/ 10.1016/j.jseaes.2014.06.008
- Zhao, Y.D., Mo, X.X., Li, S.C., et al., 2015. Zircon U-Pb LA-ICP-MS Dating, Petrogeochemical Features of Granitic Mylonite in Northwestern Lesser Hinggan Mountains, and Tectonic Significance. *Geological Review*, 61 (2): 443-456(in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Chi, X. G., Liu, J. F., et al., 2010. Late Paleozoic Arc-Related Magmatism in Yakeshi Region, Inner Mongolia: Chronological and Geochemical Evidence. Acta Petrologica Sinica, 26(11): 3245-3258 (in Chinese with Einglish abstract).
- Zhou, C. Y., Wu, F. Y., Ge, W. C., et al., 2005. Age Geochemistry and Petrogenesis of the Cumulate Gabbro in Tabe, Northern Da Hinggan Mountain. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 763-775 (in Chinese with Einglish abstract).
- Zhou, Z. G., Liu, C. F., Wang, G. S., et al., 2019. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of the Dashizhai Ophiolitic Mélange Belt, Southeastern Xing'an-Mongolia Orogenic Belt. *International Journal* of Earth Sciences, 108(1): 67-88. https://doi.org/ 10.1007/s00531-018-1642-6
- Zhu, X. Y., Liu, G. P., 1995. Geochemical Characteristics of Paleozoic Marine Volcanic Rocks in Southen Hulun Buir League, Inner Mongolia, and Their Geological Significance. Acta Petrologica et Mineralogica, 14(2): 109– 118(in Chinese with Einglish abstract).

附中文参考文献

- 付俊彧, 汪岩, 那福超, 等, 2015. 内蒙古哈达阳镁铁-超镁 铁质岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征: 对嫩江-黑 河地区晚泥盆世俯冲背景的制约.中国地质, 42(6): 1740-1753.
- 葛文春,隋振民,吴福元,等,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.
- 洪大卫,黄怀曾,肖宜君,等,1994.内蒙古中部二叠纪碱性
 花岗岩及其地球动力学意义.地质学报,68(3):
 219-230.
- 黎广荣,迟效国,董春艳,等,2006.大兴安岭中段东南部糜 棱岩化花岗岩的 Rb-Sr 年龄.吉林大学学报(地球科学 版),36(S1):11-14.

- 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.
- 李良, 孙丰月, 李碧乐, 等, 2018. 漠河地区黑云母花岗闪长 岩地球化学、Hf同位素特征及其成因. 地球科学, 43 (2): 417-435.
- 李瑞山, 1991. 新林蛇绿岩. 黑龙江地质, 2(1):19-32.
- 李守军,赵秀丽,贺森,等,2014. 东北地区晚古生代构造演 化与格局.山东科技大学学报(自然科学版),33(4): 1-5.
- 马永非,刘永江,温泉波,等,2017.大兴安岭中段晚三叠世 哈达陶勒盖组火山岩成因及构造背景.地球科学,42 (12):2146-2173.
- 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等,2009.中国大地构造单元划 分.中国地质,36(1):1-28.
- 钱程,陈会军,陆露,等,2018a.黑龙江省龙江地区新太古 代花岗岩的发现.地球学报,39(1):27-36.
- 钱程,陆露,秦涛,等,2018b.大兴安岭北段扎兰屯地区晚 古生代早期花岗质岩浆作用:对额尔古纳一兴安地块 和松嫩地块拼合时限的制约.地质学报,92(11): 2190-2214.
- 权京玉, 迟效国, 张蕊, 等, 2013. 松嫩地块东部新元古代东 风山群碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意 义. 地质通报, 32(2): 353-364.
- 邵军,李永飞,周永恒,等,2015.中国东北额尔古纳地块新 太古代岩浆事件钻孔片麻状二长花岗岩锆石 LA ICP MS测年证据.吉林大学学报(地球科学版),45(2): 364-373.
- 苏养正,1996.中国东北区古生代生物地层学几个问题.吉 林地质,15(3-4):66-69.
- 孙德有,吴福元,李惠民,等,2000.小兴安岭西北部造山后 A型花岗岩的时代及与索伦山一贺根山-扎赉特碰撞 拼合带东延的关系.科学通报,45(20):2217-2222.
- 孙凡婷, 刘晨, 邱殿明, 等, 2018. 大兴安岭东坡小奎勒河中

基性侵入岩成因及地球动力学意义: 锆石 U-Pb 年代 学、元素和 Hf 同位素地球化学证据. 吉林大学学报(地 球科学版), 48(1): 145-164.

- 唐克东, 1989. 中朝陆台北侧褶皱带构造发展的几个问题. 现代地质, 3(2): 195-204.
- 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.
- 王照元,郑常青,徐久磊,等,2018.内蒙古莫尔道嘎佳疙瘩 组变质岩地球化学特征及构造意义.地球科学,43(1): 176-198.
- 徐备,赵盼,鲍庆中,等,2014.兴蒙造山带前中生代构造单 元划分初探.岩石学报,30(7):1841-1857.
- 许文良,孙德有,尹秀英,1999.大兴安岭海西期造山带的 演化:来自花岗质岩石的证据.长春科技大学学报,29 (4):319-323.
- 杨宾,张彬,张庆奎,等,2018.内蒙古东部马鞍山地区早石 炭世高镁安山岩特征及地质意义.地质通报,37(9): 1760-1771.
- 张渝金,张超,吴新伟,等,2016.大兴安岭北段扎兰屯地区 晚古生代海相火山岩年代学和地球化学特征及其构造 意义.地质学报,90(10):2706-2720.
- 赵院冬,莫宣学,李士超,等,2015.小兴安岭西北部花岗质 糜棱岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、岩石地球化学特 征及地质意义.地质论评,61(2):443-456.
- 赵芝, 迟效国, 刘建峰, 等, 2010. 内蒙古牙克石地区晚古生 代弧岩浆岩:年代学及地球化学证据. 岩石学报, 26 (11): 3245-3258.
- 周长勇,吴福元,葛文春,等,2005.大兴安岭北部塔河堆晶 辉长岩体的形成时代、地球化学特征及其成因.岩石学 报,21(3):763-775.
- 祝新友,刘国平,1995.内蒙古呼盟南部地区古生代海相火 山岩地球化学特征及其地质意义.岩石矿物学杂志, 14(2):109-118.