

辽宁海城地区老虎沟基性岩墙锆石 U-Pb-Hf 同位素、地球化学特征及其地质意义

王博¹, 何艳红², 孟祥舒², 务磊², 徐可心²

(1. 陕西省宝玉石教学示范中心, 陕西国际商贸学院珠宝学院, 陕西 西安 710264; 2. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069)

摘要: 胶-辽-吉活动带是华北板块重要的古元古代造山带, 与南北两侧的狼林地块和龙岗地块通过断层接触, 共同构成了东部陆块。造山带内分布有大量的变沉积岩系, 并在多期岩浆-变质事件的改造下, 经历了十分复杂的构造演化过程。其中, 在辽宁海城—草河口地区分布着大量古元古代变质基性岩墙, 分别为北东—南西走向的什司县基性岩墙群和北西—南东走向的老虎沟基性岩墙群。什司县基性岩墙与北辽河群中的浪子山岩组和里尔峪岩组呈互层状产出于胶-辽-吉带内, 老虎沟基性岩墙高角度侵入到龙岗地块东南缘新太古宙片麻岩中。LA-ICPMS 锆石 U-Pb-Hf 同位素测试结果显示老虎沟基性岩经历 $(1\,864 \pm 15)\text{Ma}$ 的变质作用, 锆石 Hf 同位素一阶段模式年龄 (T_{DM1}) 为 $2\,040 \sim 2\,293\text{Ma}$, 代表了老虎沟基性岩从地幔中抽取出来的时间。以上测试结果与辽阳地区什司县基性岩年代学记录和 Hf 同位素数据一致。主、微量元素地球化学分析结果亦表明, 老虎沟基性岩墙与什司县基性岩墙的地化特征基本一致, 均具有右倾型的稀土配分模式, 选择性富集大离子亲石元素和亏损高场强元素, 暗示两者形成于相似的构造环境。在 Nb/Yb-Th/Yb 图解中, 老虎沟基性岩和什司县基性岩样品均具有 Th 的强烈富集, 指示了俯冲作用的存在。但是老虎沟基性岩具有相对较高的 Nb/Zr 值, 说明其源区经历过硅酸盐熔体的交代富集作用, 而什司县基性岩低的 Nb/Zr 和变化较大的 Th/Zr 值指示其源区受到了流体的交代作用。综上分析, 老虎沟基性岩和什司县基性岩形成于同一构造背景, 二者源区分别受到了硅酸质熔浆和流体的交代作用, 随后受 $1\,930 \sim 1\,850\text{Ma}$ 的俯冲碰撞造山作用的影响发生了变质。

关键字: 胶-辽-吉构造带; 老虎沟基性岩墙群; 锆石 U-Pb 年龄, Hf 同位素

中图分类号: P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2017)02-0080-15

Petrogenesis and Tectonic Significance of Laohugou Mafic Dykes in Haicheng, Liaoning Province: Evidence from Zircon U-Pb-Hf Isotopes and Whole-rock Geochemistry

WANG Bo¹, HE Yanhong², MENG Xiangshu², WU Lei², XU Kexin²

(1. Shaanxi gemological experimental teaching demonstration center, Department of Jewelry, Shaanxi Institute of international Trade and Commerce, Xi'an 712046, Shaanxi, China;

2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: As one of important Paleo-proterozoic orogenic belts formed in North China craton, the

收稿日期: 2016-12-16; 修回日期: 2017-03-08

基金项目: 西北大学大陆动力学国家重点实验室自主研究课题, 国家自然科学基金(41102121)

作者简介: 王博(1988-), 男, 山东泰安人, 助教, 硕士, 主要从事岩浆岩构造环境演化研究。E-mail: wbclear@163.com

Jiao-Liao-Ji belt was deposited massive meta-sedimentary rocks, underwent a complex tectonic evolution process with the modification by multiple stages of magmatic and metamorphic events, and it merged with Langrim Block in south and with Longgang Block in north to form the Eastern Block. A swarm of Paleoproterozoic metamorphic mafic dykes was exposed in the Haicheng-Caohekou area, Liaoning Province, including NE-SW trend Shensixian mafic dykes swarm and NW-SE trend Laohugou mafic dykes. Shensixian mafic dyke swarm was outcropped in the Jiao-Liao-Ji Belt, intercalated with the Langzishan and Lieryu Formations of the North Liaohe Group, while the Laohugou mafic dykes was intruded into the Neoarchean gneisses along the Southeastern margin of the Longgang block with high angle. LA-ICP MS zircon U-Pb dating and LA-MC-ICP MS Lu-Hf isotopic analyses on the sample from the Laohugou mafic dykes yielded a metamorphic age of $(1\,864 \pm 15)$ Ma, and T_{DM1} (Hf) ages (Hf model ages) of $2\,040 \sim 2\,293$ Ma, which are comparable with the record of the Shensixian mafic dyke swarm. Whole-rock major and trace element analyses display the comparability between the Shensixian and Laohugou dykes, both of them are characterized with the enrichment of the LREE and LILE and depletion of the HSFE, implying that the Shensixian and Laohugou mafic dykes were formed in the similar tectonic environment. In the Nb/Yb-Th/Yb diagram, the geochemical data of the Laohugou and Shensixian mafic rocks display Th enrichment, indicating a subduction-related metasomatism. But Laohugou mafic rocks have higher Nb/Zr ratios than the Shensixian mafic rocks, implying the metasomatism by silicate melt in the source region, while the low Nb/Zr ratios with variable Th/Zr ratios of the Shensixian mafic rocks indicate a fluid metasomatism in the source. In conclusion, Laohugou and Shensixian mafic dykes were formed in the same tectonic background, both of them were metasomatised by the silicate melts and fluids, respectively, which were metamorphosed during the subduction and collision event in $1\,930 \sim 1\,850$ Ma.

Keywords: Jiao-Liao-Ji belt; Laohugou mafic dykes; zircon U-Pb dating; Hf isotopes

华北克拉通是世界上最古老克拉通之一,主要由下部的太古宙—古元古代变质结晶基底和其上的中元古代—新生代盖层组成。长期以来,对于华北克拉通前寒武纪构造格架的划分一直存在着不同的认识。例如,伍家善等(1998)的五分、ZHAI 和 SANTOSH 的七分和 ZHAO et al 的二分等(ZHAO, 2014)。这些观点争论的焦点在于华北板块克拉通的形成以及拼合的过程(ZHAO et al., 2001, 2005, 2012, 2014; KUSKY et al., 2003; KUSKY et al., 2007; ZHAI et al., 2003; ZHAI et al., 2011, 2005; KUSKY et al., 2010; PENG et al., 2012; PENG et al., 2014)。部分研究者认为华北克拉通在 $2\,500$ Ma 左右完成了结晶基底的克拉通化,并于 $2\,000 \sim 1\,800$ Ma 期间发生板块的活化再改造过程(ZHAI et al., 2005; KUSKY et al., 2010; ZHAI et al., 2011; PENG et al., 2012, 2014; 翟明国, 2004);而有的研究者则认为华北克

拉通可分为太古宙—早元古代东部陆块和西部陆块,二者于 $\sim 1\,850$ Ma 沿中部带(Trans-North China Orogen)碰撞拼合形成现今的华北克拉通统一结晶基底(ZHAO, 2014; ZHAO et al., 2012, 2005, 2001)。ZHAO 和 ZHAI(2013)强调华北克拉通基底构造格架的划分关键在于碰撞型边界的识别(Zhao et al., 2013)。目前,华北克拉通内部已经识别出3条古元古代构造活动带:华北中部碰撞造山带,西部的孔兹岩带和东部的胶-辽-吉活动带(ZHAO, 2014; ZHAO et al., 2012, 2013; KUSKY et al., 2003, 2007; ZHAI et al., 2005, 2011; LI et al., 2011)。华北中部碰撞造山带代表了西部陆块与东部陆块最终聚合形成的陆-陆碰撞带,孔兹岩带则是阴山地体与鄂尔多斯地体拼贴形成西部陆块的碰撞带(ZHAI et al., 2005, 2003; ZHAO, 2014; ZHAO et al., 2012, 2005, 2001),而胶-辽-吉活动带的性质尚存在较大争论。近年来,

对胶-辽-吉活动带也已经展开了大量的岩石学、地球化学、年代学和构造变形方面的研究。其大地构造性质和演化过程主要存在2种观点:陆内裂谷闭合模式(张秋生等, 1988; LI et al., 2005, 2006, 2007, 2012, 2004; LUO et al., 2004, 2006, 2008)和陆-陆俯冲拼贴模式(白瑾等, 1994; FAURE et al., 2004; MENG et al., 2014; LU et al., 2006)。

胶-辽-吉带主要由绿片岩相到角闪岩相变质的沉积-火山岩, 以及大量的早元古代花岗质岩石和镁铁质侵入体组成。其中, 镁铁质侵入岩主要以辉长岩和辉绿岩为主, 现已基本变质为斜长角闪岩。镁铁质侵入岩成群成带产出, 胶-辽-吉带的北缘, 以北东-南西和北西-南东方向侵入到元古宙地层和太古宙花岗质片麻岩中, 分别被命名为什司县和老虎沟组基性岩墙群。什司县基性岩墙与北辽河群中的浪子山岩组和里尔峪岩组呈互层状产出, 已经开展了大量工作(FAURE et al., 2004; MENG et al., 2014; YUAN et al., 2015; 王惠初等, 2011; 李星云等, 1989; 于介江等, 2007; 关会梅等, 2008; 苗来成等, 2010; 秦亚等, 2015), 认为其具有岛弧玄武岩的地球化学特征, 形成于 $\sim 2\ 160\text{Ma}$ 左右, 并于 $\sim 1\ 870\text{Ma}$ 经历了变质作用。但是, 至今尚未见到有关老虎沟基性岩墙的任何报道。因此, 笔者通过对辽宁海城地区老虎沟基性岩墙的岩相学、地质年代学和地球化学分析, 为胶-辽-吉构造带的地质演化历程提供了一定的证据。

1 区域地质背景

胶-辽-吉活动带从胶东, 经辽东-吉南, 进入北朝鲜境内, 呈北东-南西向分隔北部的龙岗地块和南部的狼林地块, 是制约华北克拉通东部陆块早元古代构造演化的关键因素(ZHAO et al., 2005)。胶-辽-吉带以北的龙岗陆块由太古宙花岗质深成侵入岩和少量的表壳岩组成, 主要为大面积分布的英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩岩体(TTG)和大小不等的包体状残存于花岗质深成侵入体中的变质表壳岩, 岩石普遍经历了角闪岩-麻粒岩相变质(万渝生等, 2001; 刘敦一等, 2007; SONG et al., 1996; LIU et al., 2008)。U-Pb 锆石年代学显示其形成峰期为 $\sim 2.5\text{Ga}$ (万渝生等, 2001, 2005; WU et al., 2005), 碎屑锆石则记录到了 $3\ 800\sim$

$2\ 500\text{Ma}$ 的多期次岩浆-构造事件, 并在鞍山-本溪地区发现了 $\sim 3\ 800\text{Ma}$ 的奥长花岗片麻岩体(WAN et al., 2013, 2012; 万渝生等, 2005; LIU et al., 2008)。胶-辽-吉带以南的狼林陆块以大面积分布的新元古代($\sim 2\ 500\text{Ma}$)英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩岩体(TTG)(路孝平等, 2004; MENG et al., 2014; 孙景贵等, 1992)为特征, 经历了角闪岩相变质(陈斌等, 2016)。辽东地区的辽河群不整合于太古宙变质杂岩之上, 并被中元古界榆树砬子组不整合覆盖(辽宁省地矿局, 1989)。辽河群自下而上可分为浪子山组、里尔峪组、高家峪组、大石桥组和盖县组, 常以盖县-析木城-塔子岭-荏草甸子-绥阳为界划分为南、北2个岩石单元(王惠初等, 2011)。北辽河群由石英岩、片岩、千枚岩、变粒岩和大理岩组成, 原岩建造为陆源碎屑岩-碳酸盐岩建造, 岩石的成分成熟度较高; 南辽河群由浅粒岩、变粒岩、片麻岩、片岩、大理岩和石英岩组成, 原岩建造为火山岩-陆源碎屑岩-碳酸盐岩建造(贺高品等, 1998)。有研究者依据浪子山组碎屑锆石的年龄记录限定辽河群沉积时限为 $2\ 050\sim 1\ 930\text{Ma}$ (LUO et al., 2004; LUO et al., 2008), 但是在南辽河群中发现的大量 $1\ 885\text{Ma}$ 变质锆石记录, 被解释为辽河群的沉积顶界年龄(孟恩等, 2013)。

辽宁海城地区位于胶-辽-吉活动带的北缘, 区内发育有太古宙片麻岩系, 早元古代层状变质火山-沉积岩系(辽河群)和侵入杂岩体, 后者包括顺层侵入的花岗岩和基性岩墙。基性岩墙以其产状分别被命名为北西-南东向的老虎沟组基性岩墙和北东-南西什司县组基性岩墙(1:5万南台幅)。老虎沟基性岩墙主要出露于海城市什司县镇以西地区(图1), 宽度约 $20\sim 50\text{cm}$, 延伸 $0.5\sim 2\text{km}$ 不等, 以高角度($>60^\circ$)侵入到龙岗地块东南缘新太古宙虎庄白云斜长片麻岩和上英黑云片麻岩中。老虎沟基性岩墙原岩为辉长-辉绿岩, 已经变质为斜长角闪岩。斜长角闪岩呈深灰色或深绿色, 中粗粒, 具有粒状变晶结构, 局部可见变余辉长结构, 片麻状构造。矿物组合主要由角闪石($\sim 65\%$)、斜长石($\sim 30\%$)和少量的黑云母($<5\%$)组成, 部分岩石薄片可见少量石英颗粒。斜长石、石英等呈现他形晶形态, 角闪石多呈半自形的长柱状, 轻微绿泥石化, 部分已蚀变为绿帘石。副矿物则主要有磷灰石、磁铁矿、榍石和锆石等。

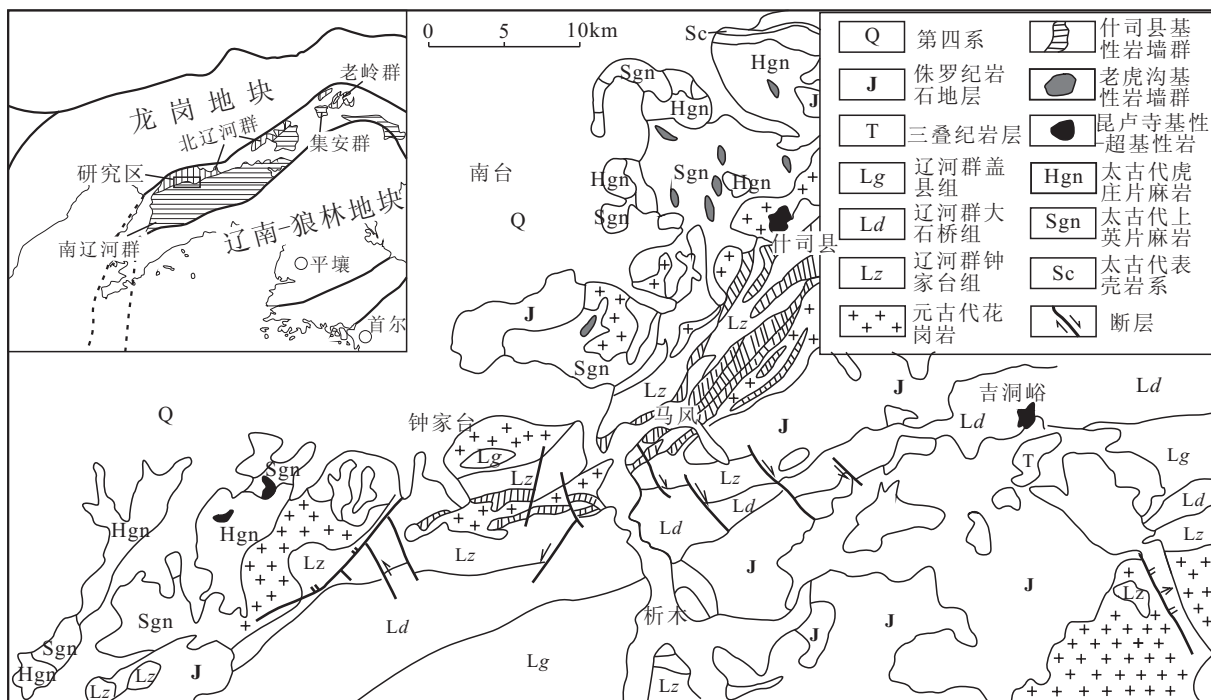


图1 辽宁海城地区地质简图(据刘永江等,1996 修改)

Fig.1 Geological map of Haicheng area, Liaoning Province

2 测试方法

对老虎沟基性岩 8 个样品进行了主量、微量元素测试,并选取 1 个样品进行了锆石 U-Pb、Lu-Hf 同位素测试。

主、微量及稀土元素的分析和锆石阴极发光(CL)图像采集与 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年均是在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。主量元素采用碱熔玻璃片在日本理学 RIX2100X 荧光光谱仪上分析获得,实验中先制备玻璃熔片,测试过程中采用 BCR-2 和 GBM07105 标样以及重复样监控,分析精度一般优于 2%,烧失量采用湿法化学法分析获得;微量元素和稀土元素含量经酸溶后采用 LA-ICP-MS 测定,实验仪器型号为 Perkin Elmer 公司 Elan6100DRC 电感耦合等离子质谱仪。样品经 AVG-1、BCR-1 和 BHVO-1 等国际标样以及空白样监控,每间隔 10 个样品重复测试一次标样,Co、Ni、Zn、Ga、Rb、Y、Zr、Nb、Ta 和 REE(除 Hf 和 Lu)等元素分析精度优于 5%,其他低浓度元素的分析精度介于 5%~10%。

锆石 CL 图像采集由安装在美国 FEI 公司 FEI Quanta 400 FEG 扫描电镜上的英国 Gatan 公司的 Mono CL3+ 型阴极荧光探头完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析在 Hewlett Packard 公司的 Agilent 7500a ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 Excimer 激光器以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200 M 光学系统上联机进行。激光束斑直径为 30 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,并利用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST 610 进行仪器最佳化。锆石年龄计算采用标准锆石 91500 作为外部标准物质,数据处理采用 ICPMSDataCal 程序(刘勇胜, Ver9.0);U-Pb 谐和图采用 ISOPLOT 程序(Ver 3.0)获得(YUAN et al., 2007, 2008)。

锆石原位 Hf 同位素测定采用德国 Microlas 公司的 Geolas200M 激光剥蚀系统与英国 Nu 公司的 Nu-PlasmaHR 多接收器等离子质谱仪联机完成。激光束斑直径为 40 μm ,脉冲频率为 10Hz。测试采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.026\ 69$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.588\ 6$ 对样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值进行同量异位干扰校正计

算测定(CHU et al., 2002)。在样品测试过程加入 91500 和 GJ-1 作为标样测试, 来进行样品校正和仪器状态监控。锆石 Hf 亏损地幔模式年龄(T_{DM1})的计算采用现今的亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.283\,25$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.038\,4$ (VERVOORT ET al, 1999), 一阶段 Hf 模式年龄 T_{DM1} 以亏损地幔为参考计算。

3 测试结果

3.1 地球化学特征

主量元素测试结果见表 1, 分析结果如下: 老虎

沟基性岩墙样品的 $w(\text{SiO}_2)$ 变化较小(48.29%~48.93%), $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 2.95%~3.49%, $w(\text{MgO})$ 为 7.06%~7.33%, $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 为 12.64%~13.85%, CaO 为 10.26%~11.23%, Al_2O_3 为 13.75%~14.36%。根据 $\text{Nb}/\text{Y} - \text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001$ 图解(图 2a), 样品投在亚碱性玄武岩区域。在 AFM 图解中(图 2b), 样品具有较高的 TFeO, 落入拉斑玄武岩系列区域。 $\text{Mg}^\#$ 值平均为 55(54.3~56.8), Cr 和 Ni 含量分别为 $100 \times 10^{-6} \sim 234 \times 10^{-6}$ 和 $76.8 \times 10^{-6} \sim 107 \times 10^{-6}$ 。

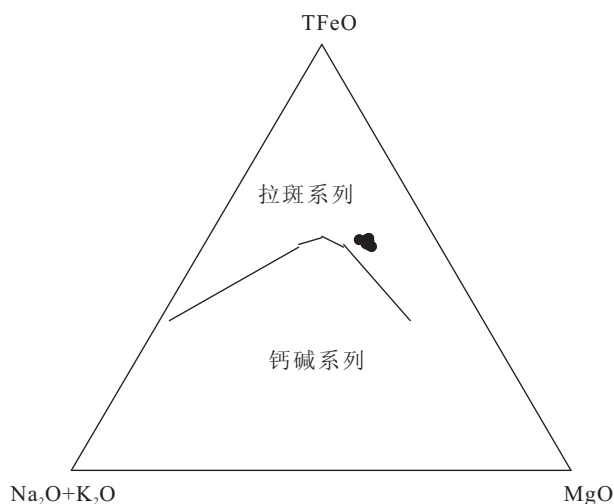
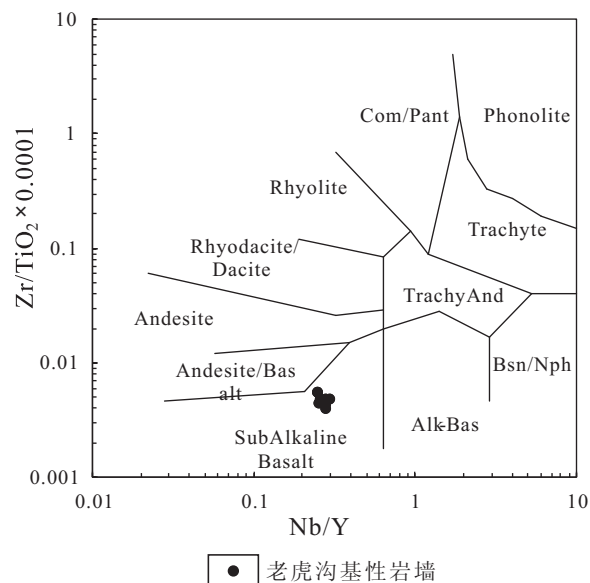


图 2 (a) $\text{Nb}/\text{Y} - \text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001$ 和 (b) AFM 图解

Fig. 2 (a) The $\text{Nb}/\text{Y} - \text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001$ and (b) AFM diagrams

样品稀土总量较低, REE 总量为 $51.87 \times 10^{-6} \sim 70.08 \times 10^{-6}$ 。稀土分馏程度较低(图 3), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 2.29~2.98, Eu 异常不明显或具有微弱的正 Eu 异常, δEu 为 0.91~1.02, 表明无显著斜长石的结晶分异。原始地幔标准化微量元素分配图上(图 4), 样品显示大离子亲石元素 Rb、K、Sr 的富集, Nb、Ta、Ti 相对亏损。

3.2 锆石 LA-ICPMS 测年结果

斜长角闪岩样品 15LJ33 采自什司县地区西北部, 样品中获得的锆石无色透明, 颗粒浑圆, 粒径为 20~50 μm 左右, 集中在 40 μm 。大部分锆石 CL 图像发光程度较弱, 或者不发光, CL 图像基本无分带(图 5)。少量 CL 图像发光强度较高, 扇形分带, 部分颗粒可见到核幔结构(图 5), 但因粒径太小, 无法

分别测试。本次研究共分析了 36 个数据点, 谐和度基本上在 95% 以上(表 2)。Th/U 值为 0.01~0.20, 大部分小于 0.1, 是典型变质锆石的特征。根据计算, 锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均年龄在 $(1\,864 \pm 15)\text{Ma}$ 左右, 代表了老虎沟基性岩墙的变质年龄(图 6)。

3.3 锆石原位 Lu-Hf 同位素测试结果

老虎沟基性岩样品 15LJ33 的锆石原位 Lu-Hf 同位素原始数据见表 3。其中, 10 个锆石颗粒的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值较小, 为 0.000 154~0.000 406, 说明该样品锆石的 Lu-Hf 同位素体系保持稳定, 自结晶后无明显放射性 Hf 同位素加入。而其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 590~0.281 798, 经计算, 样品的一阶段 Hf 同位素模式年龄为 2 040~2 293 Ma。

表 1 基性岩石主、微量地球化学数据
Tab. 1 Major and trace element data of basic rocks

样品编号	15LJ33-2	15LJ33-3	15LJ33-3R	11LD009-1	11LD009-4	11LD009-6	11LD009-7	11LD010-2
岩体属性	老 虎 沟 基 性 岩							
SiO ₂	48.29	48.71	48.62	48.93	48.69	48.53	48.75	48.38
TiO ₂	1.23	1.20	1.20	1.26	1.25	1.26	1.41	1.6
Al ₂ O ₃	14.36	14.09	14.08	14.05	14.18	13.98	13.92	13.75
TF _{e2} O ₃	13.36	13.20	13.25	12.64	12.96	12.97	13.25	13.85
MnO	0.20	0.20	0.20	0.17	0.18	0.18	0.18	0.19
MgO	7.20	7.30	7.28	7.33	7.17	7.32	7.08	7.06
CaO	11.09	11.17	11.16	11.23	10.91	11.09	10.87	10.26
Na ₂ O	2.11	2.22	2.25	2.28	2.37	2.31	2.24	2.9
K ₂ O	0.86	0.78	0.78	0.67	0.79	0.78	0.8	0.59
P ₂ O ₅	0.12	0.13	0.13	0.12	0.11	0.11	0.13	0.15
LOI	0.75	0.69	0.68	1.22	0.93	1.03	0.93	1.5
TOTAL	99.57	99.69	99.63	99.9	99.54	99.56	99.56	100.23
Li	2.46	2.56	2.59	4.25	3.23	3.11	3.05	4.36
Be	0.65	0.65	0.66	0.55	0.65	0.6	0.69	0.77
Sc	35.1	36.0	36.4	38.5	37.4	35.9	38.2	38.8
V	251	254	253	308	299	284	302	339
Cr	118	118	119	234	122	121	100	145
Co	55.6	55.3	56.1	63.6	69.3	63.5	61.8	52.4
Ni	85.5	82.2	82.6	107	94.3	89.8	76.8	89.2
Cu	25.8	21.6	21.6	123	9.95	4.27	4.24	43
Zn	94.2	94.1	95.1	84	92.4	90.5	94.8	97.5
Ga	19.3	18.9	19.0	18.1	19.5	18.7	19.6	19.5
Ge	1.68	1.67	1.70	1.62	1.68	1.69	1.69	1.86
Rb	13.4	8.26	7.98	28.8	12.7	11.3	11.4	16.9
Sr	304	299	303	298	324	308	304	385
Y	22.4	23.1	23.3	20.4	19.5	19.6	21.8	23.9
Zr	59.0	66.2	65.7	55.5	54.2	49.7	66.6	76.5
Nb	5.90	5.84	5.86	5.17	5.45	5.51	6.09	7.08
Cs	0.12	0.11	0.10	0.23	0.29	0.22	0.17	0.16
Ba	45.0	40.8	41.1	119	47.4	44.9	45.8	142
La	8.38	8.52	8.90	6	7.03	6.83	7.72	8.32
Ce	21.0	21.2	22.6	15.1	17.1	16.8	18.9	20.1
Pr	2.88	2.93	3.08	2.27	2.49	2.42	2.74	3.04
Nd	14.2	14.5	15.0	11.1	12	11.7	13.1	14.6
Sm	3.83	3.96	4.05	3.23	3.3	3.15	3.6	3.94
Eu	1.25	1.23	1.25	1.08	1.09	1.1	1.25	1.34
Gd	4.18	4.31	4.35	3.55	3.52	3.52	3.89	4.29
Tb	0.69	0.71	0.71	0.6	0.58	0.57	0.65	0.71
Dy	4.20	4.33	4.28	3.7	3.57	3.59	3.97	4.35
Ho	0.84	0.86	0.88	0.75	0.71	0.71	0.8	0.87
Er	2.33	2.39	2.38	2.05	1.95	1.96	2.18	2.41
Tm	0.32	0.33	0.33	0.3	0.29	0.28	0.32	0.34
Yb	2.02	2.06	2.06	1.88	1.73	1.74	1.93	2.13
Lu	0.29	0.29	0.30	0.26	0.25	0.25	0.28	0.3
Hf	1.78	1.94	1.93	1.61	1.56	1.47	1.89	2.13
Ta	0.42	0.42	0.42	0.34	0.35	0.36	0.4	0.45
Pb	6.09	5.89	5.97	4.02	6.23	6.03	5.97	5.31
Th	1.10	1.13	1.18	0.76	0.94	0.94	1.05	1.11
U	0.28	0.28	0.29	0.18	0.25	0.23	0.28	0.29

表 2 老虎沟基性岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年原始数据
Tab. 2 LA-ICPMS zircon U-Pb dating data of Laohugou basic rocks

样品及测点	Th/U	同位素比值及其误差					同位素年龄及其误差					谐和度	谐和年龄	1σ		
		207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U	207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U					
		1σ		1σ		1σ	1σ		1σ		1σ					
15LJ33-1-01	0.047 201	0.113 427	0.001 708	5.817 997	0.103 851	0.371 56	0.004 162	1 855. 25	27. 932 5	1 949. 094	15. 522 91	2 036. 737	19. 591 84	95 %	1 855. 25	27. 932 5
15LJ33-1-02	0.040 611	0.112 424	0.001 409	5.238 391	0.077 083	0.337 672	0.003 39	1 839. 2	22. 38	1 858. 884	12. 609 78	1 875. 462	16. 367 7	99 %	1 839. 2	22. 38
15LJ33-1-03	0.038 844	0.112 563	0.001 39	5.127 695	0.069 382	0.329 884	0.002 592	1 842. 595	22. 225	1 840. 705	11. 564 73	1 837. 624	12. 604 67	99 %	1 842. 595	22. 225
15LJ33-1-04	0.007 36	0.112 99	0.001 462	5.110 661	0.069 133	0.327 381	0.002 242	1 847. 84	23. 922 5	1 837. 879	11. 555 32	1 825. 667	10. 933 67	99 %	1 847. 84	23. 922 5
15LJ33-1-05	0.005 852	0.113 768	0.001 622	5.101 12	0.085 075	0.324 421	0.003 383	1 861. 115	25. 925	1 836. 292	14. 213 57	1 811. 286	16. 497 15	98 %	1 861. 115	25. 925
15LJ33-1-06	0.101 638	0.114 603	0.001 946	5.260 442	0.103 927	0.332 404	0.004 208	1 873. 77	31. 325	1 862. 467	16. 903 44	1 850. 025	20. 385 12	99 %	1 873. 77	31. 325
15LJ33-1-07	0.586 486	0.127 238	0.001 997	5.959 197	0.126 376	0.339 495	0.005 592	2 061. 105	27. 47	1 969. 908	18. 487 52	1 884. 242	26. 931 58	95 %	2 061. 105	27. 47
15LJ33-1-08	0.034 395	0.116 385	0.001 952	5.800 424	0.109 703	0.360 503	0.003 965	1 901. 85	29. 477 5	1 946. 474	16. 433 28	1 984. 556	18. 816 89	98 %	1 901. 85	29. 447 5
15LJ33-1-09	0.036 683	0.114 751	0.001 725	5.073 716	0.077 959	0.319 822	0.002 523	1 876. 24	26. 385	1 831. 721	13. 092 35	1 788. 858	12. 361 28	97 %	1 876. 24	26. 385
15LJ33-1-10	0.13 383	0.113 299	0.001 598	4.930 215	0.074 858	0.314 576	0.002 847	1 853. 71	25. 927 5	1 807. 443	12. 876 2	1 763. 188	13. 994 37	97 %	1 853. 71	25. 927 5
15LJ33-1-11	0.019 843	0.115 371	0.001 736	5.339 635	0.092 271	0.333 962	0.003 328	1 887. 04	31. 945	1 875. 231	14. 833 39	1 857. 554	16. 112 92	99 %	1 887. 04	31. 945
15LJ33-1-12	0.030 88	0.113 954	0.001 844	4.916 593	0.087 153	0.311 597	0.003 338	1 864. 82	28. 545	1 805. 108	15. 007 12	1 748. 562	16. 431 83	96 %	1 864. 82	28. 545
15LJ33-1-13	0.042 315	0.115 893	0.002 009	5.914 028	0.123 45	0.368 011	0.004 98	1 894. 445	31. 172 5	1 963. 296	18. 178 71	2 020. 034	23. 492 53	97 %	1 894. 445	31. 172 5
15LJ33-1-14	0.048 324	0.111 735	0.001 806	5.489 92	0.100 229	0.355 066	0.004 322	1 828. 085	29. 475	1 899. 02	15. 734 43	1 958. 743	20. 586 96	96 %	1 828. 085	29. 475
15LJ33-1-15	0.025 759	0.112 907	0.001 711	5.006 228	0.079 329	0.320 2	0.002 723	1 846. 61	26. 7	1 820. 376	13. 467 96	1 790. 706	13. 311 28	98 %	1 846. 61	26. 7
15LJ33-1-16	0.033 562	0.113 198	0.001 59	5.137 488	0.08	0.328 023	0.003 286	1 851. 55	25. 662 5	1 842. 327	13. 294 36	1 828. 793	15. 981 83	99 %	1 851. 55	25. 622 5
15LJ33-1-17	0.062 856	0.112 811	0.002 185	4.812 339	0.105 725	0.308 944	0.004 294	1 855. 56	35. 185	1 787. 057	18. 509 42	1 735. 51	21. 168 68	97 %	1 855. 56	35. 185
15LJ33-1-18	0.030 567	0.113 271	0.001 838	5.597 234	0.108 123	0.356 696	0.004 517	1 853. 71	25	1 915. 673	16. 692 15	1 966. 495	21. 489 51	97 %	1 853. 71	25
15LJ33-1-19	0.069 869	0.112 581	0.001 955	5.533 202	0.102 206	0.355 375	0.003 876	1 842. 595	31. 48	1 905. 77	15. 937 56	1 960. 213	18. 463 04	97 %	1 842. 595	31. 48
15LJ33-1-20	0.049 607	0.118 25	0.001 769	5.091 132	0.090 749	0.328 835	0.003 397	1 829. 32	23. 305	1 834. 628	15. 179 14	1 832. 734	16. 508 09	99 %	1 829. 32	23. 305
15LJ33-1-21	0.029 925	0.113 124	0.001 511	4.955 15	0.086 657	0.316 132	0.003 865	1 850. 31	25. 16	1 811. 704	14. 826 78	1 770. 81	18. 957	97 %	1 850. 31	25. 16
15LJ33-1-22	0.035 994	0.111 608	0.001 533	5.087 995	0.075 224	0.329 491	0.003 14	1 825. 61	19. 91	1 834. 106	12. 608 02	1 835. 916	15. 258 59	99 %	1 825. 61	19. 91
15LJ33-1-23	0.038 489	0.112 911	0.001 644	5.138 271	0.081 781	0.328 855	0.003 285	1 846. 61	26. 545	184. 456	13. 586 03	1 832. 829	15. 966 58	99 %	1 846. 61	26. 545
15LJ33-1-24	0.059 531	0.114 158	0.002 09	5.492 135	0.105 363	0.347 8	0.003 735	1 866. 36	33. 022 5	1 899. 367	16. 529 6	1 924. 084	17. 895 26	98 %	1 866. 36	33. 022 5
15LJ33-1-25	0.017 734	0.111 712	0.001 866	5.254 761	0.132 379	0.338 903	0.005 739	1 827. 775	29. 785	1 861. 545	21. 527 28	1 881. 39	27. 647 99	98 %	1 827. 775	29. 785
15LJ33-1-26	0.036 215	0.114 872	0.001 819	5.322 463	0.098 773	0.335 449	0.004 138	1 879. 63	27. 93	1 872. 477	15. 913 93	1 864. 738	20. 002 52	99 %	1 879. 63	27. 93
15LJ33-1-27	0.203 747	0.116 05	0.002 025	5.076 883	0.095 857	0.316 903	0.003 311	1 895. 99	31. 482 5	1 832. 25	16. 065 15	1 774. 588	16. 237 79	96 %	1 895. 99	31. 482 5
15LJ33-1-28	0.082 279	0.116 145	0.002 015	5.148 963	0.102 761	0.320 866	0.003 736	1 898. 15	31. 175	1 844. 223	17. 015 35	1 793. 955	18. 258 6	97 %	1 898. 15	31. 175
15LJ33-1-29	0.056 658	0.115 854	0.001 911	5.367 316	0.097 24	0.336 027	0.003 51	1 894. 445	29. 627 5	1 879. 655	15. 559 25	1 887. 527	16. 965 1	99 %	1 894. 445	29. 627 5
15LJ33-1-30	0.036 222	0.114 45	0.002 084	5.848 225	0.136 758	0.369 826	0.005 473	1 872. 225	33. 332 5	1 953. 586	20. 320 46	2 028. 579	25. 780 53	96 %	1 872. 225	33. 332 5
15LJ33-1-31	0.001 628	0.105 764	0.001 672	3.853 132	0.093 697	0.263 447	0.004 727	1 727. 775	34. 102 5	1 603. 924	19. 633 84	1 507. 452	24. 134 11	93 %	1 727. 775	34. 102 5
15LJ33-1-32	0.026 497	0.111 728	0.002 044	4.693 837	0.103 897	0.304 264	0.004 066	1 827. 47	33. 335	1 766. 141	18. 566 84	1 712. 419	20. 116 51	96 %	1 827. 47	33. 335
15LJ33-1-33	0.034 171	0.115 199	0.001 792	5.712 041	0.113 473	0.358 998	0.004 883	1 883. 335	28. 082 5	1 933. 191	17. 216 17	1 977. 421	23. 187 12	97 %	1 883. 335	28. 082 5
15LJ33-1-34	0.063 002	0.116 552	0.001 912	5.006 801	0.084 778	0.311 243	0.002 525	1 905. 555	28. 55	1 820. 473	14. 384 11	1 746. 819	12. 449 28	95 %	1 905. 555	28. 55
15LJ33-1-35	0.067 855	0.115 02	0.001 937	6.607 867	0.112 153	0.416 377	0.003 485	1 879. 94	30. 09	2 060. 398	15. 033 88	2 244. 011	15. 905 97	91 %	1 879. 94	30. 09
15LJ33-1-36	0.097 358	0.117 373	0.001 862	5.516 97	0.097 987	0.340 05	0.003 584	1 916. 355	29. 167 5	1 903. 244	15. 321 75	1 886. 911	17. 272 04	99 %	1 916. 355	29. 167 5

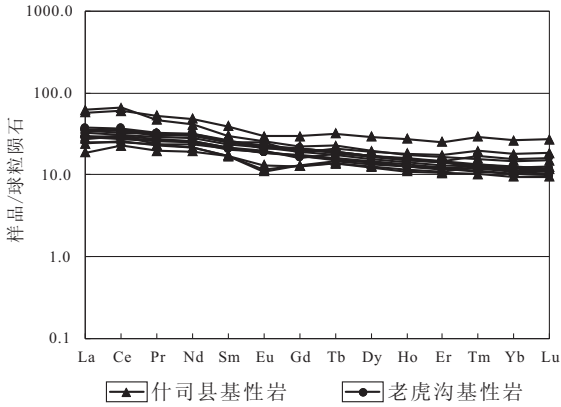
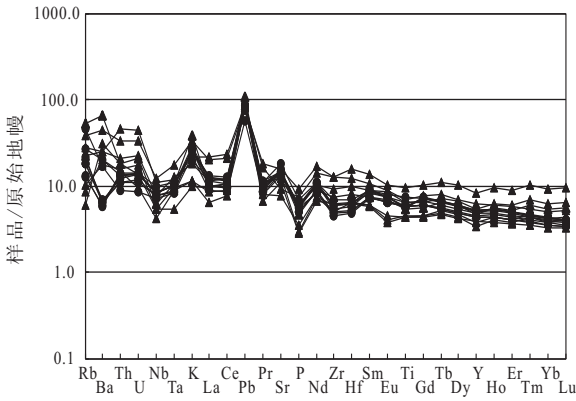


图 3 老虎沟基性岩墙稀土元素配分图
(什司县组地球化学原始数据来自王惠初等, 2011)

Fig. 3 Chondrite - normalized REE patterns of the Laohugou Mafic Dykes



(图例及原始数据来源如图 3 所示)
图 4 老虎沟基性岩墙微量元素蛛网图
Fig. 4 Primitive mantle normalized trace element patterns of the Laohugou Mafic Dykes

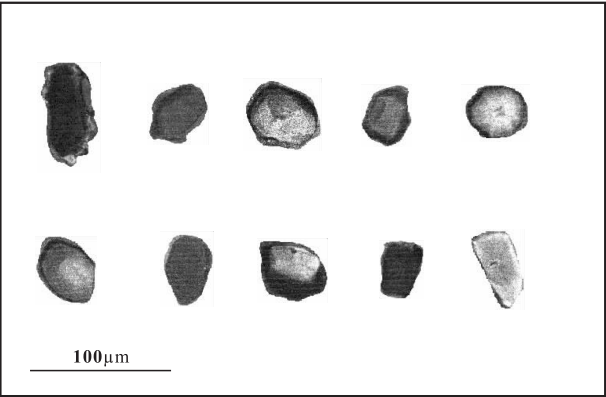


图 5 老虎沟基性岩墙锆石 CL 图像
Fig. 5 SEM cathodoluminescence (CL) images of sectioned zircon grains from the Laohugou mafic rocks

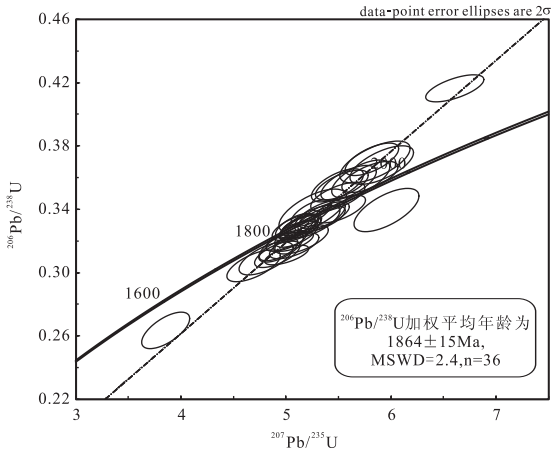


图 6 老虎沟基性岩墙锆石 U - Pb 年龄谐和图
Fig. 6 La - ICPMS zircon U - Pb Concordia diagram of the Laohugou Mafic Dykes

表 3 老虎沟基性岩锆石 Lu - Hf 同位素组成
Tab. 3 Zircon Lu - Hf isotopic compositions of the Laohugou mafic rocks

样品号	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	T _{DM} (Hf)	f _L u/Hf
15LJ33-1-1	0.007 371	0.000 015	0.000 386	0.000 001	0.281 722	0.000 012	2 113	-0.99
15LJ33-1-2	0.006 556	0.000 016	0.000 352	0.000 001	0.281 679	0.000 009	2 169	-0.99
15LJ33-1-3	0.005 905	0.000 005	0.000 323	0.000 000	0.281 763	0.000 009	2 054	-0.99
15LJ33-1-4	0.005 907	0.000 010	0.000 356	0.000 000	0.281 798	0.000 013	2 009	-0.99
15LJ33-1-5	0.005 586	0.000 011	0.000 299	0.000 001	0.281 715	0.000 012	2 118	-0.99
15LJ33-1-6	0.005 111	0.000 009	0.000 275	0.000 001	0.281 730	0.000 016	2 291	-0.99
15LJ33-1-7	0.006 725	0.000 017	0.000 358	0.000 001	0.281 590	0.000 016	2 291	-0.99
15LJ33-1-8	0.005 574	0.000 023	0.000 302	0.000 001	0.281 635	0.000 011	2 226	-0.99
15LJ33-1-9	0.007 711	0.000 005	0.000 406	0.000 000	0.281 590	0.000 014	2 293	-0.99
15LJ33-1-10	0.003 154	0.000 010	0.000 154	0.000 000	0.281 767	0.000 014	2 040	-1.00

注: 采样点 GPS 坐标为北纬 40°54.871', 东经 122°56.862'。

4 老虎沟基性岩墙的形成时代

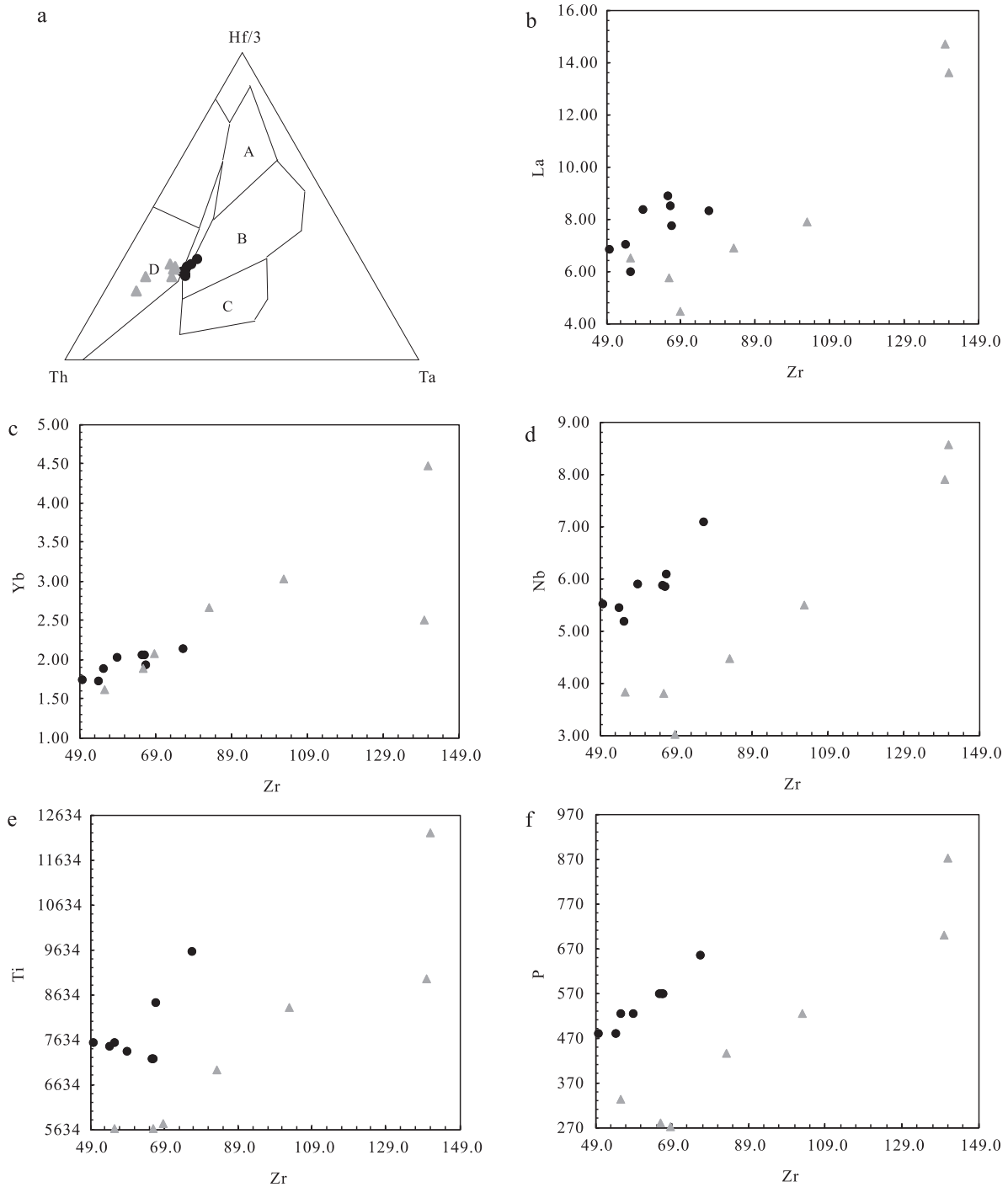
胶-辽-吉活动带位于华北克拉通东部陆块的东段,主要分布于胶北、辽东和吉南地区,是我国保存较完整的古元古代构造活动带。长期以来,辽东地区的元古宙研究工作(白瑾等,1994;张秋生等,1988;贺高品等,1998;LI et al.,2005,2006,2007;TAM et al.,2011)主要集中在胶-辽-吉活动带内的变质沉积-火山岩(辽河群)、早元古代花岗质和镁铁质侵入体。辽河群碎屑锆石测年结果显示辽河群沉积于2.03Ga之后,并经历了1.93~1.90Ga和~1.85Ga变质作用的改造(LUO et al.,2008,2004;LU XP et al.,2006;孟恩等,2013)。早元古代花岗质岩石包括2200~2100Ma期间侵位的构造前条纹状花岗岩和1880~1850Ma期间侵位的造山后或者非造山斑状二长花岗岩和碱性正长岩(LI et al.,2007;路孝平等,2004)。什司县基性岩(镁铁质侵入体)已获得了(2110±31)Ma的斜锆石年龄(董春艳等,2012),~2150Ma的岩浆锆石年龄(MENG et al.,2014)和(1874±31)Ma的变质锆石年龄(秦亚等,2015)。

笔者对北西-南东向老虎沟基性岩墙进行了LA ICP-MS 锆石 U/Pb 年龄和 Hf 同位素分析。斜长角闪岩样品 15LJ33 中 36 个分析点给出了一致的(1864±15)Ma 上交点年龄。依据因其浑圆的晶形,不发光的 CL 图像和低的 Th/U 值,推断~1860Ma 代表了老虎沟基性岩的变质年龄。锆石一阶段 Hf 同位素模式年龄(T_{DM1})为 2040~2293 Ma,代表了老虎沟基性岩从地幔中抽取出来的时间,与什司县基性岩的 Hf 模式年龄范围基本一致(MENG et al.,2014)。因此,老虎沟基性岩墙与什司县基性岩均是 2100~2300 Ma 从亏损地幔中分离出来,并共同经历了 1930~1850Ma 的俯冲碰撞造山事件(FAURE et al.,2004;LUO et al.,2008;LUO et al.,2004;MENg et al.,2014;王惠初等,2015;路孝平等,2004;LU et al.,2006;秦亚等,2015)。

5 岩浆成因

老虎沟基性岩墙样品具有较低的 SiO_2 和较高

的 TFe_2O_3 和 MgO 含量,表明老虎沟基性岩浆为地幔部分熔融的产物。但是较低的 MgO 含量(<8%) 和 $\text{Mg}^\#$ (54.3~56.8) 值指示老虎沟基性岩不可能是地幔初始熔融的产物,经历了显著地镁铁矿物的结晶分异或者地壳混染。主、微量地球化学特征显示老虎沟基性岩具有较窄的变化范围,排除了岩浆上升-侵位过程中显著地壳混染的可能。根据各主量元素氧化物相对于 MgO 的 harker 图解所示,随着岩浆演化的不断进行,主量元素的协变特征与发生了镁橄榄石、单斜辉石等矿物析出的分离结晶过程较为一致,而斜长石的分离结晶作用并不明显。高 Th/La (0.13~0.14) 和 La/Yb (3.19~4.31) 值以及低 Nb/U (20.10~28.72) 和 Ce/Pb (2.74~3.79) 值说明基性岩的地幔源区受到了地壳物质的混染或者富集组分的交代(STERN,2002)。什司县基性岩墙(MENG et al.,2014;YUAN et al.,2015;王惠初等,2011)因具有放射性成因的 Nd 和锆石 Hf 同位素,低的稀土元素总量和右倾型的配分模式,以及大离子亲石元素(Rb,Ba 和 K) 相对富集和高场强元素(Nb,Ta 和 Ti) 相对亏损的地球化学特征,被解释为受俯冲流体交代的亏损地幔的部分熔融的产物,形成与岛弧有关的构造环境(MENG et al.,2014;YUAN et al.,2015;王惠初等,2011)。老虎沟基性岩墙的地化特征与什司县基性岩墙的地化特征基本一致,也具有右倾型的稀土配分模式和选择性富集大离子亲石元素和亏损高场强元素的特征,暗示两者形成于相似的构造环境。在 $\text{TiO}_2-\text{MnO} \times 10 - \text{P}_2\text{O}_5 \times 10$ 图解(图 7a) 上,老虎沟基性岩样品投在岛弧拉斑玄武岩和洋脊玄武岩区域,与辽阳地区的什司县基性岩区域投点一致,指示二者均形成于大陆边缘环境。而根据 $\text{Nb/Yb}-\text{Th/Yb}$ 图解(图 8) 所示,相对于地幔源区,较高的 Th/Yb 值说明老虎沟和什司县基性岩更富集 Th 元素,反映两套基性岩的形成与俯冲作用有关(PEARCE et al.,2008)。同时,因为强不相容元素 Th,Nb 和 Zr 具有相近的分配系数,所以其元素对比值,如 Th/Nb 值和 Zr/Nb 值一般不会受到部分熔融和结晶分异的显著影响,因此同源岩浆一般具有相同或相近的比值。而老虎沟基性岩相比什司县基性岩具有较低的 Th/Nb 值和 Zr/Nb 值,指示二者起源于不同的源区。REE 元素、Nb、Ti 和 P 对 Zr 二元投图(图 7b、7c、7d、7e、7f) 结果显示老虎沟



MORB, 洋中脊玄武岩; IAT, 岛弧拉斑玄武岩; CAB, 钙碱性玄武岩; OIT, 洋岛拉斑玄武岩; OIA, 洋岛碱性玄武岩

(图例及原始数据来源如图 3 所示)

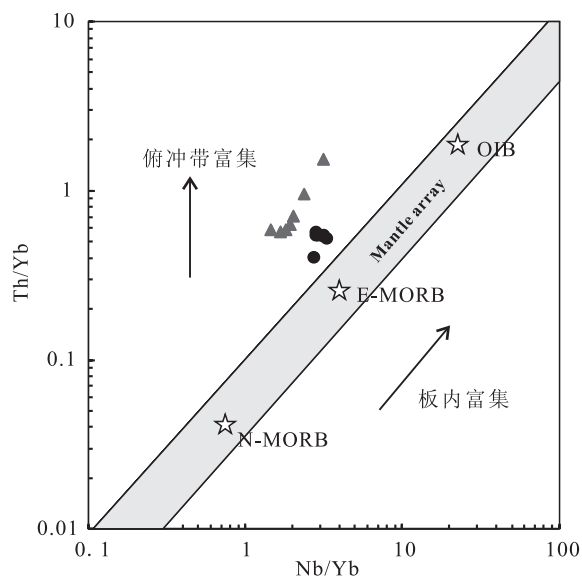
图 7 (a) $\text{TiO}_2 - \text{MnO} \times 10 - \text{P}_2\text{O}_5 \times 10$ 判别图解及 (b, c, d, e, f) La、Yb、Nb、Ti、P vs Zr 图解

Fig. 7 (a) $\text{TiO}_2 - \text{MnO} \times 10 - \text{P}_2\text{O}_5 \times 10$, (b) La、Yb、Nb、Ti、P vs Zr diagrams

基性岩在一定的 Zr 含量上具有较高的轻稀土元素和高场强元素含量, 指示其源区相对什司县基性岩地幔源区更加富集。此外, 在受到流体交代作用的影响时, Nb 元素会比 U、Th 等元素表现出更强烈的

迁移能力 (BRENAN et al., 1994), 故可以根据 Th/Zr 值、Nb/Zr 值识别出不同的俯冲组分。如图 9 所示, 老虎沟基性岩具有相对较高的 Nb/Zr 值, 说明其源区经历过硅酸盐熔体的富集作用, 而什司县基性岩

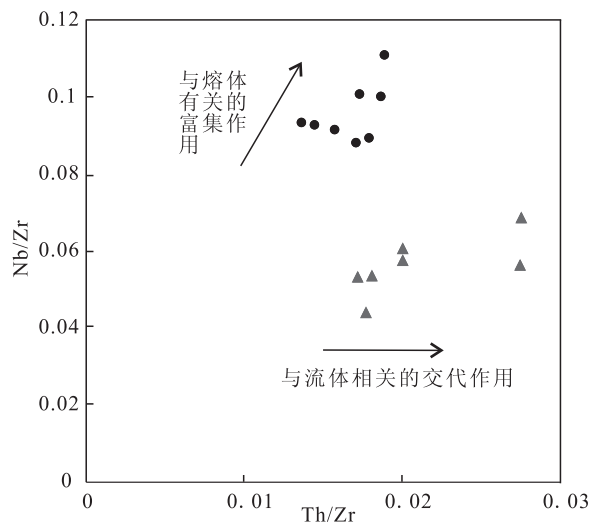
源区受到了流体的交代作用导致其相对较低的 Nb/Zr 和变化较大的 Th/Zr 值 (KEPEZHINSKASET al., 1997)。



(图例及原始数据来源如图 3 所示)

图 8 Nb/Yb - Th/Yb 图解 (PEARCE et al., 2008)

Fig. 8 Nb/Yb - Th/Yb diagram



(图例及原始数据来源如图 3 所示)

图 9 Th/Zr - Nb/Zr 图解 (KEPEZHINSKASET al., 1997)

Fig. 9 Th/Zr - Nb/Zr diagram

6 结论

基性岩墙群常表现为大面积的大型线状构造,是地壳层状杂岩和火山岩的岩浆通道,可以产出多种

构造背景:如离散性的板块边缘 (ERNST et al., 2001)、俯冲-碰撞型的构造环境中 (HARLAN et al., 2008) 以及地幔柱环境 (ERNST et al., 2001)。

华北克拉通广泛发育前寒武纪基性岩墙群。它们在不同时代均有产生,其中以古元古代末期 (1 800 Ma 前后) 的规模最大,分布范围最广,几乎遍布整个克拉通,对揭示华北克拉通该期构造演化过程以及限定华北克拉通化的时限具有非常重要的意义。目前,关于该时代岩墙群的形成环境,研究者仍具有较大的争议。部分学者认为其与造山过程无关,并依据岩墙群的分布特征推测可能是由于地幔柱引起的伸展事件 (彭澎等, 2004); 而部分学者则认为其是在约 1 800 Ma 东部与西部陆块碰撞造山之后的拉张环境 (ZHAO et al., 2001; WILDE et al., 2002), 并与超大陆的裂解事件有关。

辽宁海城-草河口地区分布着大量古元古代变质基性岩墙,分别为产出北辽河群的北东-南西走向的什司县基性岩墙群和侵入太古宙虎庄、上英片麻岩的北西-南东走向的老虎沟基性岩墙群。主、微量元素地球化学分析结果显示老虎沟基性岩墙与什司县基性岩墙的地化特征基本一致,均具有右倾型的稀土配分模式,选择性富集大离子亲石元素和亏损高场强元素。在 $\text{TiO}_2 - \text{MnO} \times 10 - \text{P}_2\text{O}_5 \times 10$ 构造环境判别图解 (图 7a) 上,老虎沟基性岩和什司县基性岩样品共同落入岛弧拉斑玄武岩和洋脊玄武岩区域,指示两者均形成于大陆边缘环境,而相对富集 Th 元素则反映了俯冲过程的影响 (图 8)。但是老虎沟基性岩具有相对较高的 Nb/Zr 值,说明其源区经历过硅酸质熔体的交代富集作用,而什司县基性岩低的 Nb/Zr 和变化较大的 Th/Zr 值指示其源区受到了流体的交代作用 (图 9)。LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 测年结果显示老虎沟基性岩记录了 $(1\ 864 \pm 15)\text{Ma}$ 变质作用,一阶段 Hf 模式年龄则限制其成岩年龄晚于 $2\ 040 \sim 2\ 293\text{Ma}$,这与辽阳地区什司县基性岩年代学记录较为一致。综上所述,老虎沟基性岩和什司县基性岩形成于同一构造背景,二者的地幔源区分别受到了岛弧岩浆和流体的交代作用,随后受 $1\ 930 \sim 1\ 850\text{Ma}$ 的俯冲碰撞造山作用的影响发生了变质。因此,通过对老虎沟基性岩墙年代学和地球化学的分析,认为胶-辽-吉活动带可能形成于弧 (陆)-陆碰撞过程,这也为华北板块于 1 800 Ma 最终完成克拉通化提供了一定的证据。

参考文献(References):

- 白瑾,戴凤岩.中国早前寒武纪的地壳演化[J].地球学报,1994(Z2):73-87.
- BAI Jin, DAI Fengyan. The early Precambrian crust evolution of China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1994(Z2): 73-87.
- 陈斌,李壮,王家林,等.辽东半岛~2.2 Ga 岩浆事件及其地质意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2016,46(2):303-320.
- CHEN Bin, LI Zhuang, WANG Jialin, et al. Liaodong Peninsula ~2.2 Ga Magmatic Event and Its Geological Significance[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2016, 46(2): 303-320.
- 董春艳,马铭株,刘守偈,等.华北克拉通元古代中期伸展体制新证据:鞍山-弓长岭地区变质辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年和全岩地球化学[J].岩石学报,2012,28(9):2785-2792.
- DONG Chunyan, MA Mingzhu, LIU Shoujie, et al. Middle Paleoproterozoic crustal extensional regime in the North China Craton: New evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry of meta-gabbro in the Anshan-Gongchangling area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(9):2785-2792.
- 关会梅,刘俊来,赵胜金.变形角闪质岩石流动变形及其意义——以辽东古元古宙褶皱带变形斜长角闪岩为例[J].吉林大学学报(地球科学版)2008,38(5):777-0783.
- GUAN Huimei, LIU Junlai, ZHAO Shengjin. Flow and Deformation Mechanisms of Hornblende Rocks-Example of Deformed Amphibolites from the Paleoproterozoic Fold Belt in Liaodong Peninsula[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2008, 38(5): 777-0783.
- 贺高品,叶慧文.辽东-吉南地区早元古代变质地体的组成及主要特征[J].长春科技大学学报,1998,28(2):121-126.
- HE Gaopin, YE Huiwen. Composition and main characteristics of early proterozoic metamorphic terranes in eastern Liaoning and southern jilin areas[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1998, 14(2): 152-162.
- 李星云,张秀华.辽宁结晶基底斜长角闪岩地球化学特征[J].辽宁地质,1989(2):97-109.
- LI Xingyun, ZHANG Xiuhua. Geochemical characters of amphibolite in crystalline basement of Liaoning[J]. Liaoning Geology, 1989(2): 97-109.
- 辽宁省地矿局.辽宁省区域地质志[M].北京:地质出版社,1989.
- Liaoning Bureau of Geology and Mineral Resources (LBGM), Regional Geology of Liaoning Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.
- 刘敦一,万渝生,伍家善,等.华北克拉通太古宙地壳演化和最古老的岩石[J].地质通报,2007,26(9):1131-1138.
- LIU Dunyi, WAN Yusheng, WU Jiashan, et al. Archean crustal evolution and the oldest rocks in the North China craton[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(9): 1131-1138.
- 刘永江,李三忠.辽宁海城-大石桥-吉洞地区早元古代花岗岩[J].辽宁地质,1996,(1):10-18.
- LIU Yongjiang, LI Sanzhong. Palaeoproterozoic granite in Haicheng-Dashiqiao-Jidong area, Eastern Liaoning[J]. Liaoning Geology, 1996,(1):10-18.
- 路孝平,吴福元,林景仟,等.辽东半岛南部早前寒武纪花岗岩质岩浆作用的年代学格架[J].地质科学,2004,39(1):123-138.
- LU Xiaoping, WU Fuyuan, LIN Jingqian, et al. Geochronological successions of the Early Precambrian granitic magmatism in Southern Liaodong Peninsula and its constraints on tectonic evolution of the North China Craton (in Chinese) [J]. Scientia Geologica Sinica, 2004, 39(1):123-138.
- 孟恩,刘福来,刘平华,等.辽东半岛东北部宽甸地区南辽河群沉积时限的确定及其构造意义[J].岩石学报,2013,29(7):2465-2480.
- MENG En, LIU Fulai, LIU Pinghua, et al. Depositional ages and tectonic implications for South Liaohe Group from Kuandian area in northeastern Liaodong Peninsula, Northeast China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(7):2465-2480.
- 苗来成,张福勤,刘敦一,等.辽宁海城炒铁河辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义[J].科学通报,2010,(4):342-349.
- MIAO Laicheng, ZHANG Fuqin, LIU Dunyi, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating for gabbro at Chaotiehe in the Haicheng area, eastern Liaoning[J]. Chinese Sci Bull, 2010,(4):342-349.
- 秦亚,梁一鸿,张青伟,等.辽东地区什司县变质基性岩墙群的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其意义[J].矿物学报,2015,35(4):540-544.
- QIN Ya, LIANG Yihong, ZHANG Qingwei, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of plagioclase amphibolite from Shensixian mafic dyke swarm in Liaodong area,

- China and its significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2015, 35(4): 540-544.
- 孙景贵, 林强, 葛文春. 辽宁金州地区太古宙英云闪长岩体的变形与侵位的构造环境[J]. *吉林地质*, 1992, 11(4): 28-35.
- SUN Jinggui, LIN Qiang, GE Wenchun. Deformation of Archean tonalitic intrusions in the Jinzhou area, Liaoning Province: implications for the tectonic setting of their emplacement[J]. *Jilin Geol.*, 1992, 4: 28-35.
- 万渝生, 宋彪, 刘敦一, 等. 鞍山东山风景区 3.8~2.5 Ga 古老岩带的同位素地质年代学和地球化学[J]. *地质学报*, 2001, 75(3): 363-370.
- WAN Yusheng, SONG Biao, LIU Dunyi, et al. Geochronology and geochemistry of 3.8~2.5 Ga ancient rock belt in the dongshan scenic park, Anshan area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(3): 363-370.
- 万渝生, 宋彪, 杨淳, 等. 辽宁抚顺-清原地区太古宙岩石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *地质学报*, 2005, 79(1): 78-87.
- WAN Yusheng, SONG Biao, YANG Chun, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology of Archean Rocks from the Fushun-Qingyuan Area, Liaoning Province and Its Geological Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79: 78-87.
- 王惠初, 陆松年, 初航, 等. 辽阳河栏地区辽河群中变质基性熔岩的锆石 U-Pb 年龄与形成构造背景[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(5): 1322-1334.
- WANG Huichu, LU Songnian, CHU Hang, et al. Zircon U-Pb age and tectonic setting of meta-basalts of Liaohu Group in Helan area, Liaoyang, Liaoning Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(5): 1322-1334.
- 王惠初, 任云伟, 陆松年, 等. 辽吉古元古代造山带的地层单元划分与构造属性[J]. *地球学报*, 2015, 36(5): 583-598.
- WANG Huichu, REN Yunwei, LU Songnian et al. Stratigraphic Units and Tectonic Setting of the Paleoproterozoic Liao-Ji Orogen[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36(5): 583-598.
- 于介江, 杨德彬, 冯虹, 等. 辽南海城斜长角闪岩原岩的形成时代: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年证据[J]. *世界地质*, 2007, 26(4): 391-396.
- YU JieJiang, YANG Debin, FENG Hong, et al. Chronology of amphibolite protolith in Haicheng of southern Liaoning: evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb dating[J]. *Global Geology*, 2007, 26(4): 391-397.
- 翟明国. 华北克拉通 2.1~1.7 Ga 地质事件群的分解和构造意义探讨[J]. *岩石学报*, 2004 (6): 1343-1354.
- ZHAI Mingguo. 2.1~1.7 Ga geological event group and its geotectonic significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(6): 1343-1354.
- 张秋生. 辽东半岛早期地壳与矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 218-331.
- ZHANG Qiusheng. Early Crust and Mineral Deposits of Liaodong peninsula China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 218-331.
- BRENANJ M, SHAW H F, RYERSON F J, et al. Rutile fluid partitioning of Nb, Ta, Zr, U and Th: implications for high-field-strength element depletions in island arc basalts [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 128: 327-339.
- CHUN C, TAYLOR R N, CHAVAGNAC V, et al. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: an evaluation of isobaric interference corrections[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2002, 17(12): 1567-1574.
- ERNSTR E, GROSFILS E B, MEGE D. Giant dike swarms: Earth, venus, and mars[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2001, 29(1): 489-534.
- FAUREM, LIN W, MONIE P, et al. Palaeoproterozoic arc magmatism and collision in Liaodong Peninsula (north-east China)[J]. *Terra Nova*, 2004, 16(2): 75-80.
- HARLAN S S, GEISSMAN J W, SNEE L W. Paleomagnetism of Proterozoic mafic dikes from the Tobacco Root Mountains, southwest Montana[J]. *Precambrian Research*, 2008, 163(3): 239-264.
- KEPEZHINSKAS P, MCDERMOTT F, DEFANT M J, et al. Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(3): 577-600.
- KUSKY T M, WINDLEY B F, ZHAI M G. Tectonic evolution of the North China Block: from orogen to craton to orogen[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2007, 280(1): 1-34.
- KUSKY T M, LI J. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 22(4): 383-397.
- KUSKY T M, ZHAI M, XIAO W. The evolving continents: understanding processes of continental growth-introduction[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2010, 338(1): 1-6.
- LIS Z, ZHAO G C, SANTOSH M, et al. Palaeoproterozoic-tectonothermal evolution and deep crustal processes in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: a review[J]. *Geological Journal*, 2011, 46(6): 525-543.

- LIS, ZHAO G. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaojigranitoids: constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the Eastern Block of the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2007, 158(1): 1-16.
- LIS, ZHAO G, SANTOSH M, et al. Paleoproterozoic structural evolution of the southern segment of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2012, 200: 59-73.
- LIS, ZHAO G, SUN M, et al. Mesozoic, not Paleoproterozoic SHRIMP U-Pb zircon ages of two Liaoji Granites, eastern block, North China craton [J]. *International Geology Review*, 2004, 46(2): 162-176.
- LIS, ZHAO G, SUN M, et al. Deformation history of the Paleoproterozoic Liaohe assemblage in the Eastern Block of the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24(5): 659-674.
- LIS, ZHAO G, SUN M, et al. Are the south and north Liaohe Groups of North China Craton different exotic terranes? Nd isotope constraints [J]. *Gondwana Research*, 2006, 9(1): 198-208.
- LIU D, WILDE S A, WAN Y, et al. New U-Pb and Hf isotopic data confirm Anshan as the oldest preserved segment of the North China Craton [J]. *American Journal of Science*, 2008, 308(3): 200-231.
- LUX P, WU F Y, GUO J H, et al. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern block in the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2006, 146(3): 138-164.
- LUO Y, SUN M, ZHAO G, et al. A comparison of U-Pb and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the North and South Liaohe Groups: constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2008, 163(3): 279-306.
- LUO Y, SUN M, ZHAO G, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Yushulazi Group in the eastern block, North China craton [J]. *International Geology Review*, 2006, 48(9): 828-840.
- LUO Y, SUN M, ZHAO G, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt [J]. *Precambrian Research*, 2004, 134(3): 349-371.
- MENGE, LIU F L, LIU P H, et al. Petrogenesis and tectonic significance of Paleoproterozoic meta-mafic rocks from central Liaodong Peninsula, northeast China: Evidence from zircon U-Pb dating and in situ Lu-Hf isotopes, and whole-rock geochemistry [J]. *Precambrian Research*, 2014, 247: 92-109.
- PEARCEJ A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust [J]. *Lithos*, 2008, 100(1): 14-48.
- PENG P, LIU F, ZHAI M G, et al. Age of the Miyun dyke swarm: constraints on the maximum depositional age of the Changcheng System [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(1): 105-110.
- PENG P, WANG X, WINDLEY B F, et al. Spatial distribution of ~ 1950 - 1800 Ma metamorphic events in the North China Craton: Implications for tectonic subdivision of the craton [J]. *Lithos*, 2014, 202: 250-266.
- SONG B, NUTMAN A P, LIU D, et al. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China [J]. *Precambrian Research*, 1996, 78(1): 79-94.
- STERN R J. Subduction zones [J]. *Reviews of geophysics*, 2002, 40(4).
- TAMP Y, ZHAO G, LIU F, et al. Timing of metamorphism in the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt: new SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites, gneisses and marbles of the Jiaobei massif in the North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 2011, 19(1): 150-162.
- VERVOORT J D, PATCHETT P J, BLICHERT-TOFT J, et al. Relationships between Lu-Hf and Sm-Nd isotopic systems in the global sedimentary system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 168(1): 79-99.
- WANY, DONG C, LIU D, et al. Zircon ages and geochemistry of late Neoproterozoic syenogranites in the North China Craton: a review [J]. *Precambrian Research*, 2012, 222: 265-289.
- WAN Y, ZHANG Y, WILLIAMS I S, et al. Extreme zircon O isotopic compositions from 3.8 to 2.5 Ga magmatic rocks from the Anshan area, North China Craton [J]. *Chemical Geology*, 2013, 352: 108-124.
- WU F, ZHAO G, WILDE S A, et al. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24(5): 523-545.
- YUAN H, GAO S, DAI M N, et al. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS [J]. *Chemical Geology*, 2008, 247(1): 100-118.
- YUAN H, GAO S, LIU X, et al. Accurate U-Pb age and

- trace element determinations of zircon by laser ablation - inductively coupled plasma - mass spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28 (3): 353-370.
- YUAN L, ZHANG X, XUE F, et al. Two episodes of Palaeoproterozoic mafic intrusions from Liaoning province, North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications[J]. Precambrian Research, 2015, 264: 119-139.
- ZHAIM G, SANTOSH M. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: a synoptic overview[J]. Gondwana Research, 2011, 20(1): 6-25.
- ZHAI M, GUO J, LIU W. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: a review[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2005, 24(5): 547-561.
- ZHAI M, LIU W. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China craton: a review [J]. Precambrian Research, 2003, 122(1): 183-199.
- ZHAO G. Precambrian Evolution of the North China Craton [M]. Newnes, 2013.
- ZHAO G, CAWOOD P A, LI S, et al. Amalgamation of the North China Craton: key issues and discussion[J]. Precambrian Research, 2012, 222: 55-76.
- ZHAO G, SUN M, WILDE S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. Precambrian Research, 2005, 136 (2): 177-202.
- ZHAO G, WILDE S A, CAWOOD P A, et al. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution [J]. Precambrian Research, 2001, 107(1): 45-73.
- ZHAO G, ZHAI M. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: review and tectonic implications[J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1207-1240.

同生矿床

同生矿床指与含矿地质建造同时生成的矿床,其成矿时代常用含矿建造的时代来代表。

(1)岩浆岩建造有关的岩浆型矿床。例如,镁质超基性岩同生 Cr-Os-Ir-Ru-镁橄榄石矿,铁质基性-超基性岩同生 Cu-Ni-Co-Pt-Pd 矿,富铁质基性-超基性岩同生 Fe-Ti-V 矿,偏碱性基性-超基性岩同生 Fe-RE-磷灰石-透辉石矿,碳酸岩-碱性超基性岩同生 Nb-RE-磷灰石矿,金伯利岩或钾镁煌斑岩同生金刚石矿,花岗伟晶岩同生 Li-Cs-Be-Nb-Ta-宝石(水晶、祖母绿、碧玺等)-白云母矿。

(2)沉积岩建造有关的沉积型矿床。例如,海相或陆相蒸发岩系同生石膏-钠盐-钾盐矿,海相黑色岩系同生 V-U-Mo-Ni-Co-Mn-磷块岩矿,陆相或海相杂色砂页岩同生 Cu-Pb-Zn-Ag 矿。

(3)沉积岩建造有关的沉积喷流型矿床。例如,海相细碎屑-碳酸盐岩同生 Pb-Zn-Ag-Fe-重晶石矿,尽管在热液喷流活动中心的矿层之下沉积岩中常可发现网脉状矿石,代表热液喷流通道,矿层相对于下伏沉积岩而言应属准同生,但相对于矿上和矿下整套含矿沉积建造而言,仍应按同生矿床对待。

(4)火山-沉积岩建造有关火山喷流型矿床。例如,海相基性火山-沉积岩系同生 Cu-Zn-Au-Ag-硫铁矿,海相中酸性或中基性火山-沉积岩系同生 Fe-Mn 矿。这些矿床一般形成于火山喷发期后或两次喷发间歇期,海底热液喷流活动的热量来源于炽热的火山岩及隐伏岩浆房等,成矿物质来源于海水与下伏火山岩的水岩作用。若相对于矿层下伏火山岩而言应属准同生,但考虑矿上和矿下火山-沉积岩系作为整套地质建造的话,也应按同生矿床对待。

(5)沉积变质岩或火山-沉积变质岩有关沉积变质型矿床。例如,火山-沉积变质岩系同生 Fe-Cu-Zn-Au 矿,沉积变质岩系同生 Fe-Pb-Zn-重晶石矿,镁质大理岩同生白云石-菱镁矿-石膏矿。

(6)河流、滨海沉积物同生砂矿床。例如,河流冲积砂砾层同生砂金矿,滨海或河流沉积物同生砂矿型磁铁矿、钛铁矿、金红石、锆石、独居石或金刚石矿。

(中国地质调查局西安地质调查中心 杨合群)