华北克拉通东部辽河群中两类斜长角闪岩年代学、 地球化学特征及其地质意义

杨玉伟1),于海峰1),石玉学1),吴奇1),孙海洋1),韩雪1),张言珑1),余超2)

1) 辽宁省物测勘查院有限责任公司,沈阳,110031; 2) 辽宁省地质矿产调查院有限责任公司,沈阳,110031

内容提要:对辽东桓仁地区辽河群高家峪组中出露的斜长角闪岩进行岩石学、地球化学及年代学研究,显示高 家峪组中的斜长角闪岩原岩为基性玄武岩,可划分为低 Ti-E-MORB 及高 Ti-OIB 两种类型:低 Ti 型样品原岩属拉 斑玄武岩系列,轻微亏损 Nb、Ta、Zr,明显亏损 P,弱轻稀土富集、重稀土亏损,具有 E-MORB 地球化学特征;高 Ti 样品原岩属碱性玄武岩系列,富集 Rb、Th、U等大离子亲石元素,轻稀土富集、重稀土亏损,具有 OIB 地球化学特 征。两类斜长角闪岩具有较低的 MgO、Cr、Ni 含量及 Mg[#]值,说明它们原岩不是原始岩浆,而是通过不同矿物相 分离结晶作用形成。锆石 U-Pb 测年表明低 Ti 型和高 Ti 型斜长角闪岩成岩年龄分别为 2158±15 Ma、2173±12 Ma,变质年龄分别为 1870±6 Ma、1861±7 Ma。区域地质特征及岩石成因研究共同指示两类斜长角闪岩形成于弧 后盆地环境,辽吉地区在古元古代早期可能处于活动大陆边缘弧后盆地构造环境,辽吉造山带的形成与弧-陆碰撞 有关。

关键词:辽河群;锆石 U-Pb;斜长角闪岩;弧后盆地;辽吉造山带

古元古代造山带作为研究地球早期历史演化的 一个重要窗口,一直以来都是国内外地质专家关注 的焦点。华北克拉通作为世界上最古老的克拉通之 一,在元古宙记录了一系列重要的构造热事件,近些 年对于华北克拉通研究中的一项重要进展便是将华 北克拉通基底划分为东部陆块和西部陆块,并在其 中识别出孔兹岩带、中部造山带和胶-辽-吉造山带 三条古元古代造山带(Zhao et al., 2012, 2013)。其 中中部造山带将华北克拉通分为东部陆块和西部陆 块,孔兹岩带将西部陆块划分为阴山陆块和鄂尔多 斯陆块、胶-辽-吉造山带将东部陆块进一步划分为 龙岗陆块和狼林陆块。目前国内外学者对孔兹岩带 和中部造山带的古元古代大地构造环境和演化过程 进行了较多的研究,总体上认为这两条造山带代表 两条喜马拉雅型的陆-陆碰撞带:阴山陆块和鄂尔多 斯陆块于 1.95 Ga 左右碰撞拼贴形成孔兹岩带,东 部陆块和西部陆块于 1.85 Ga 左右碰撞拼贴形成中 部造山带(Li et al., 2011; Zhao et al., 2012, 2013)。 而作为我国古元古界岩石出露较为完整的胶-辽-吉 造山带(延伸至辽东一吉南地区的部分称之为辽吉 造山带)研究则相对滞后,在辽东地区出现了一系列 亟待解决的关键地质问题:如辽河群形成-变质时 代,辽河群与辽吉花岗岩的关系,特别是有关辽吉造 山带的大地构造属性和演化过程一直存在较大争 议。截止目前有关辽吉造山带的大地构造属性和演 化过程存在陆内裂谷开启闭合模式(Zhang Qiusheng, 1988; Hao Defeng et al., 2004; Li et al., 2005,2011)和弧-陆碰撞、陆-陆碰撞模式(Bai Jin et al., 1993; Lu Xiaoping et al., 2004, 2005; Wang Huichu et al., 2011; Li Zhuang et al., 2015; Chen Bin et al., 2016)的争议。为解决以上问题, 学者们 对辽吉造山带内分布的古元古界变质沉积-火山岩 系的物质组成、原岩形成和变质时代,沉积环境进行 了系统研究;对带内出露的古元古代变质基性岩墙、

注:本文为中国地质调查局地质调查项目(编号 DD20160049-9)资助的成果。

收稿日期:2020-04-29;改回日期:2020-06-15;网络发表日期:2020-12-22;责任编委:张招崇;责任编辑:周健。

作者简介:杨玉伟,女,1987年生。工程师,固体矿产勘查专业。E-mail:478033166@qq.com。通讯作者:余超,男,1987年生。工程师,地 质学专业。E-mail:286149526@qq.com。

引用本文:杨玉伟,于海峰,石玉学,吴奇,孙海洋,韩雪,张言珑,余超. 2021. 华北克拉通东部辽河群中两类斜长角闪岩年代学、地球化学特征及其地质意义. 地质学报,95(12):3705~3720,doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021113.
Yang Yuwei, Yu Haifeng, Shi Yuxue, Wu Qi, Sun Haiyang, Han Xue, Zhang Yanlong, Yu Chao. 2021. Chronology, geochemical characteristics and geological significance of the two types of amphibolites within the Liaohe Group in the eastern block of the North China Craton. Acta Geologica Sinica, 95(12): 3705~3720.

花岗质岩石进行了较详细岩石学、地球化学、年代学 格架研究,并取得了一系列重要进展,为我们重新认 识辽吉造山带的早期构造演化提供了新的制约。同 时我们也看到对于辽吉造山带内辽河群中出露的斜 长角闪岩研究相对薄弱,目前仅在辽东河栏地区、三 家子地区、黄花甸子地区、海城地区对辽河群内的斜 长角闪岩有过报道,这些研究资料提供了这些变基 性岩的岩石学特征和年代学格架,在成因和形成构 造环境方面依然存在争议,包括:大洋岛弧(Ma Lijie et al., 2007), 弧后盆地(Liu Yongda et al., 1989; Meng et al., 2014) 以及陆内裂谷(Yu Jiejiang et al,2007; Wang et al., 2016), 这些争议不同程度 地限制了对区域构造演化的认识。本文首次在辽东 桓仁地区辽河群高家峪组中识别出具有低 Ti-E-MORB 和高 Ti-OIB 两类斜长角闪岩,具有 E-MORB 和 OIB 特征的火成岩是一类非常特殊的岩 石,它们只分布在一些特定的构造环境中,此类岩石 的研究对造山带的演化具有重要的意义。鉴于此, 本次工作对这两类斜长角闪岩进行较为详细的岩石 学、地球化学和同位素年代学研究,对其岩石成因、 形成环境及大地构造意义进行了探讨,为深入理解 古元古代辽吉造山带的构造格局提供了重要依据。

1 区域地质背景及岩相学特征

辽吉造山带位于华北克拉通北缘东段,呈北东-南西向展布(图 1a),造山带北侧为龙岗陆块,南侧 为辽南陆块、狼林陆块。辽吉造山带内以古元古界 变火山-沉积岩系出露规模最大、地层层序最全,分 布在辽东地区的称之为辽河群,以盖县一析木城一 南辽河群和北辽河群[●],进入吉林南部的集安、临江 地区的这套变质岩系称之为集安群、临江群[●]。研 究区位于辽吉造山带中段北缘(图 1b),属前人划分 的北辽河群,行政区划属辽宁省本溪市桓仁县黑沟 乡管辖。呈北东向展布的辽河群地层主要出露于研 究区中部(图 1c),自上而下划分为盖县组、大石桥 组、高家峪组和里尔峪组。研究区北部出露有少量 太古宙结晶基底和中生代花岗岩,南部主要出露古 元古代辽吉花岗岩,其余地区则被中生代火山岩所 覆盖。区内高家峪组出露主要岩性为大理岩、变粒 岩、黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩,以含石墨为最显 著特征。样品均采自高家峪组内,在高家峪组内斜 长角闪岩出露规模较大,片麻状构造明显。根据高 家峪组内岩石矿物共生组合分析,属低角闪岩相产 物。原岩恢复和同位素测年显示,高家峪组中变粒 岩类和片麻岩类岩石中的锆石均显示典型的振荡环 带结构,锆石 Th/U大于 0.3,为继承性岩浆成因碎 屑锆石(Yang Yuwei et al.,2020),原岩为正常的陆 源碎屑沉积岩;大理岩原岩为深海沉积的碳酸盐岩; 斜长角闪岩原岩为基性火山岩。高家峪组原岩为一 套陆源碎屑岩-碳酸盐岩-基性火山岩建造,缺少火 山碎屑岩建造。本次工作分别在关家屯和双岭子地 区的高家峪组中采集了相应样品,其中位于双岭子 地区的高家峪组地层出露完整、连续,斜长角闪岩 (低 Ti 斜长角闪岩)与组内的含石墨大理岩、含石墨 变粒岩呈互层产出,与上下岩层产状基本一致;关家 屯地区高家峪组出露面积有限,岩性出露不全,斜长 角闪岩(高 Ti 斜长角闪岩)仅与组内黑云变粒岩一 同产出。

两类斜长角闪岩样品在物质组成和结构构造方 面均具有相似性,野外未见两者直接接触关系。本 次采集的新鲜斜长角闪岩样品为粒状变晶结构,岩 石中长柱状矿物断续定向排列构成明显的片麻状构 造,主要矿物几乎全部为角闪石及斜长石(图 2)。 其中角闪石呈半自形柱状、粒状,粒径一般 0.5~1 mm,个别可达 1.5 mm,矿物长轴定向排列(图 2c、 d),含量 50%~55%。斜长石呈半自形板状一他形 粒状,粒径一般 0.5~0.1 mm,较大的可见聚片双晶, 定向分布,含量 45%~50%。岩石中还含少量柱状、 微粒状绿帘石,岩石总体上为低角闪岩相矿物组合, 镜下和人工重砂鉴定显示低 Ti 斜长角闪岩除含有 以上副矿物外,还含有较多的磁铁矿和钛铁矿。

2 测试方法

本次工作共采集9件新鲜斜长角闪岩样品进行 主量、微量元素分析,样品在国土资源部沈阳矿产资 源监督检测中心进行测试分析。主量元素分析使用 X射线荧光光谱仪(XRF-1500),其中 FeO 含量通 过湿化学方法测定。微量元素、稀土元素分析使用 等离子体质谱仪(ICP-MS)Element Ⅱ,当元素质量 分数大于 10×10⁻⁶的误差小于 5%,小于 10×10⁻⁶ 的误差小于 10%。

2件斜长角闪岩锆石样品挑选在河北省区域地 质调查研究院地质实验室完成,采用常规方法粉碎 至 80~120目,经过水淘洗、磁选、重液分离,在实体 双目镜下挑选出锆石。锆石制靶及阴极发光(CL) 图像在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成,



图 1 辽东桓仁地区地质略图(a,据 Zhao et al., 2006; b,据 Li et al., 2005)

Fig. 1 Sketch geological map of Huanren area, eastern Liaoning Province

(a, after Zhao et al., 2006; b, after Li et al., 2005)

1一新太古代二长花岗岩;2一古元古代二长花岗岩;3一早白垩世二长花岗岩;4一小岭组;5一里尔峪组;6一高家峪组;7一大石桥组;8一盖县 组;9一闪长岩脉;10一第四系;11一地质界线;12一角度不整合界线;13一断层;14一采样点

1—Late Archean monzogranitic; 2—Paleoproterozoic monzogranitic; 3—Early Cretaceous monzogranitic; 4—Xiaoling Formation; 5—Lieryu Formation; 6—Gaojiayu Formation; 7—Dashiqiao Formation; 8—Gaixian Formation; 9—diorite; 10—Quaternary; 11—geological boundaries; 12—angular unconformity; 13—fault; 14—sample location

在双目镜下仔细挑选表面平整光洁、晶型和透明度 较好的锆石颗粒,然后将它们粘贴在环氧树脂表面, 待环氧树脂固化之后对其表面抛光至锆石中心。抛 光后将锆石进行透射光、反射光和阴极发光显微照 相,通过反射光和 CL 图像详细研究锆石的晶体形 貌和内部结构特征,以选择同位素分析的最佳点。 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 原位定年在北京燕都中实 测试中心完成。锆石 U-Pb 原位定年激光剥蚀系统 为 GeoLas Pro,ICP MS 为 Agilent 7500,激光剥蚀 直径为 30 μm。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载 气,锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标标 准物质,元素含量采用 NIST SRM610 作为外标, ²⁹Si作为内标进行微量元素含量计算,使用 TEM 锆 石标样作为监控盲样来检测测试过程的稳定性。所 给定的同位素比值和年龄的误差均在 1σ 水平。分 析数据的离线处理采用软件 ICPMS Data Cal 完成。 锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均 计算均采用 Isoplot 程序进行处理。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

两类斜长角闪岩锆石 U-Pb 年龄测试结果列于



图 2 辽东桓仁地区辽河群两类斜长角闪岩野外照片和显微镜下照片(正交偏光) Fig. 2 Representative field photographs and microphotographs of two types of amphibolites in Huanren area, eastern Liaoning Province (PL)

(a、b)一低 Ti 组斜长角闪岩;(c、d)一高 Ti 组斜长角闪岩;Pl一斜长石;Hb一角闪石

(a, b)—Amphibolite of low Ti formation; (c, d)—amphibolite of high Ti formation; Pl—plagioclase; Hb—hornblende

表1,锆石阴极发光(CL)图像见图3。

从锆石阴极发光(CL)图像上可以看出,两类斜 长角闪岩的锆石具有相似性,两组样品锆石绝大多 数呈椭圆状及不规则状,部分锆石边部具有熔蚀结 构,呈港湾状、月牙状,粒径 70~130 µm,最大长宽 比为2。根据锆石内部结构和锆石 Th/U 比值可以 将锆石分为两组:一组锆石核部无分带或者弱分带, 具有低的 Th/U 比值,其中低 Ti 样品中该类锆石 Th/U=0.01~0.16,显示变质成因;高 Ti 样品该 类锆石 Th/U=0.16~0.40,除个别锆石大于 0.3 之外,绝大多数锆石小于 0.3,同样显示变质成因。 低 Ti 样品中 18 颗该类锆石构成的不一致线与谐和 线的上交点年龄为1864±5 Ma,位于谐和线上及其 附近 16 颗锆石给出的加权平均年龄为 1870 ± 6 Ma,与上交点年龄在误差范围内基本一致(图 4a), 因此 1870±6 Ma 可以作为低 Ti 组斜长角闪岩的 变质年龄;高 Ti 样品中 18 颗该类锆石与谐和线的 上交点年龄为1864±4 Ma,给出的加权平均年龄为 1861±7 Ma,与上交点年龄在误差范围内基本一致 (图 4b),1861±7 Ma 可以作为高 Ti 组斜长角闪岩 的变质年龄。二组锆石数量较少,CL图像上显示 具有核边结构,锆石核部主要呈暗色,部分保留岩浆 环带特征,可见较窄的变质增生边,具有较高的 Th/ U比值,其中低 Ti 组样品 Th/U=0.44~0.93,高 Ti 组样品 Th/U=0.47~0.80,显示该类锆石为岩 浆成因锆石。低 Ti 组样品中 6 颗该类锆石构成的 不一致线与谐和线的上交点年龄为 2156 ± 23 Ma, 给出的加权平均年龄为 2158±15 Ma(图 4c),与上 交点年龄在误差范围内基本一致。高 Ti 样品中 7 颗该类锆石构成的不一致线与谐和线的上交点年龄 为 2170 ± 7 Ma, 加权平均年龄为 2173 ± 12 Ma, 与 上交点年龄在误差范围内基本一致(图 4d)。目前 辽吉造山带内获得的古元古代基性岩浆岩(包括基 性侵入岩和基性火山岩)的年龄大体可以划分成两 个区间:~2160 Ma 至~2000 Ma、~1933 Ma 至~ 1870 Ma(Yu Jiejiang et al., 2007; Wang Huichu et al., 2011; Dong Chunyan., 2012; Qin Ya et al., 2015; Wang et al., 2016; Xu et al., 2018; Li et al.,

表 1 辽东桓仁地区两类斜长角闪岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of two types of amphibolites in Huanren area, eastern Liaoning Province

	含量(>	(10^{-6})				同位素	素比值			年龄(Ma)					
测试	000 - 7	000 1	Th/U	²⁰⁷ Pb/		²⁰⁷ Pb/		²⁰⁶ Pb/	-	²⁰⁷ Pb/		²⁰⁷ Pb/		²⁰⁶ Pb/	-
点亏	238 U	²³² Th		$^{206}\mathrm{Pb}$	1σ	²³⁵ U	1σ	238 U	1σ	²⁰⁶ Pb	1σ	²³⁵ U	1σ	²³⁸ U	1σ
低Ti现金	↓ ↓长 角 闪	」 岩(PM0)	1)												
PM01_1	647	20	0.03	0 11437	0.00051	5 18112	0.05532	0 32760	0.00310	1870	8	1850	0	1827	16
DM01 2	507	4	0.03	0.11276	0.00051	5.10112 E 10974	0.05332	0.32703	0.00313	1070	0	1050	0	1027	15
PIM01-2	507	4	0.01	0.11370	0.00059	5. 18274	0.03734	0.32941	0.00317	1860	9	1850	9	1830	15
PIM01-3	398	280	0.70	0.13446	0.00086	1.45107	0.07991	0.39995	0.00364	2157	11	2167	10	2169	17
PM01-4	954	35	0.04	0.11464	0.00075	5.15867	0.05865	0.32580	0.00366	1874	12	1846	10	1818	18
PM01-5	721	2	0.01	0.11438	0.00096	5.16806	0.06079	0.32721	0.00256	1870	15	1847	10	1825	12
PM01-6	1300	126	0.10	0.11395	0.00097	4.06663	0.05102	0.25706	0.00311	1863	15	1648	10	1475	16
PM01-7	911	50	0.06	0.11455	0.00132	5.21243	0.06271	0.33002	0.00319	1873	21	1855	10	1838	15
PM01-8	1777	32	0.02	0.11305	0.00091	5.36092	0.06967	0.34422	0.00414	1849	15	1879	11	1907	20
PM01-9	515	331	0.64	0.13481	0.00064	7.04380	0.08861	0.38001	0.00474	2162	8	2117	11	2076	22
PM01-10	1183	38	0.03	0.11468	0.00053	5.24796	0.06961	0.33236	0.00443	1875	8	1860	11	1850	21
PM01-11	657	6	0.01	0.11389	0.00112	4.59920	0.06260	0.29094	0.00292	1862	18	1749	11	1646	15
PM01-12	1092	30	0.03	0.11428	0.00125	5.13868	0.06912	0.32725	0.00385	1869	20	1843	11	1825	19
PM01-13	1658	37	0.02	0.11463	0.00107	5.29039	0.07113	0.33565	0.00462	1874	17	1867	11	1866	22
PM01-14	1174	1096	0.93	0.13676	0.00108	6.88846	0.08935	0.36526	0.00412	2187	14	2097	12	2007	19
PM01-15	369	227	0.62	0.13439	0.00072	7.07371	0.09333	0.38268	0.00485	2156	9	2121	12	2089	23
PM01-16	1474	34	0.02	0.11410	0.00094	4.86688	0.06819	0.30801	0.00354	1866	15	1797	12	1731	17
PM01-17	1324	217	0.16	0.11474	0.00049	5.10835	0.07306	0.32255	0.00432	1876	8	1837	12	1802	21
PM01-18	411	10	0.02	0.11304	0.00078	5.32550	0.07777	0.34142	0.00417	1849	12	1873	12	1893	20
PM01-19	318	200	0.63	0.13400	0.00113	7. 52582	0.11206	0.40643	0.00508	2151	15	2176	13	2199	23
PM01-20	989	45	0.05	0.11213	0.00068	5. 38344	0. 08645	0.34845	0.00566	1834	11	1882	14	1927	27
PM01-21	846	95	0.11	0.11/210	0.00133	5 3/871	0.08617	0.34073	0.00414	1869	21	1877	14	1890	20
PM01_22	1020	6	0.11	0.11410	0.00101	5 18024	0.08556	0.32706	0.00414	1866	16	18/0	14	1828	20
DM01 22	062	126	0.01	0.12201	0.00101	7 02115	0.00000	0.32730	0.00427	2125	10	2115	14	2004	25
DM01 24	1161	420	0.44	0.11205	0.00003	F 20104	0.11210	0.00010	0.00323	1060	10	1000	14	1079	20
DM01-24	1101	აა 01	0.03	0.11595	0.00111	5. 29104	0.00017	0. 33000	0.00418	1003	10	1000	14	1072	20
PIVI01-25	980	91	0.09	0.11522	0.00136	5. 22989	0.08994	0.33099	0.00493	1883	21	1898	15	1843	24
尚 11 型新	斗长用闪		.4)	0.11040	0.00005	5 05004	0.0000	0.00040	0.0005	10.10	15	1004	10	1070	1.1
HRX4-1	163	53	0.32	0.11263	0.00095	5.27284	0.06239	0.33849	0.00295	1842	15	1864	10	1879	14
HRX4-2	137	42	0.31	0.11294	0.00123	5.30187	0.06414	0.33937	0.00329	1847	20	1869	10	1884	16
HRX4-3	241	75	0.31	0.11304	0.00090	5.36809	0.08199	0.34318	0.00344	1849	14	1880	13	1902	17
HRX4-4	364	170	0.47	0.13502	0.00108	7.43830	0.05694	0.39876	0.00243	2164	14	2166	7	2163	11
HRX4-5	213	77	0.36	0.11328	0.00110	5.26489	0.09129	0.33573	0.00305	1853	17	1863	15	1866	15
HRX4-6	151	48	0.32	0.11328	0.00101	5.25137	0.07936	0.33472	0.00353	1853	16	1861	13	1861	17
HRX4-7	162	42	0.26	0.11353	0.00101	5.24869	0.08159	0.33493	0.00387	1857	16	1861	13	1862	19
HRX4-8	152	48	0.32	0.11355	0.00125	5.28355	0.05780	0.33649	0.00273	1857	20	1866	9	1870	13
HRX4-9	193	46	0.24	0.11359	0.00126	5.27460	0.05133	0.33625	0.00255	1858	20	1865	8	1869	12
HRX4-10	149	47	0.31	0.11376	0.00132	5.21913	0.05453	0.33237	0.00257	1860	21	1856	9	1850	12
HRX4-11	351	158	0.45	0.13575	0.00147	7.46995	0.08616	0.39823	0.00311	2174	19	2169	10	2161	14
HRX4-12	178	28	0.16	0.11388	0.00120	5.29162	0.05988	0.33676	0.00310	1862	19	1868	10	1871	15
HRX4-13	184	56	0.31	0.11395	0.00117	5.23300	0.05992	0.33227	0.00272	1863	18	1858	10	1849	13
HRX4-14	159	51	0.32	0.11399	0.00161	5.33833	0.11820	0.33947	0.00573	1864	26	1875	19	1884	28
HRX4-15	470	345	0.73	0.13632	0.00100	7.38183	0.06661	0.39141	0.00283	2181	13	2159	8	2129	13
HRX4-16	156	52	0.34	0.11410	0.00102	5.30963	0.05738	0.33692	0.00301	1866	16	1870	9	1872	14
HRX4-17	134	44	0.32	0.11429	0.00103	5.28976	0.05204	0.33490	0.00227	1869	16	1867	8	1862	11
HRX4-18	174	54	0.31	0.11432	0.00110	5.27039	0.05341	0.33394	0.00294	1869	17	1864	9	1857	14
HRX4-19	197	100	0.51	0.13553	0.00285	7.46116	0.13112	0.39848	0.00579	2171	37	2168	16	2162	27
HRX4-20	327	131	0.40	0.11449	0.00135	5.13931	0.05760	0.32393	0.00237	1872	21	1843	10	1809	12
HRX4-21	126	48	0.38	0.11461	0.00155	5. 22394	0.05475	0.33022	0.00227	1874	24	1857	9	1839	11
HRX4-22	134	42	0.31	0.11463	0.00165	5.25852	0.06238	0.33260	0.00319	1874	26	1862	10	1851	15
HRX4-23	162	55	0.34	0.11471	0.00101	5. 31973	0.06020	0.33536	0.00295	1875	16	1872	10	1864	14
HRX4-24	65	24	0 37	0. 11/80	0.00142	5. 26874	0. 12646	0.33316	0.00631	1877	22	1864	20	1854	30
HRX1-25	112	31	0.28	0 11501	0 00191	5 18611	0 06010	0 32634	0 00324	1880	10	1850	10	1821	16
HRY1 96	199	47	0.20	0.11501	0.00121	5 10212	0.12510	0.32034	0.00324	1801	20	1851	- 1U - 91	1822	10 99
HRX4-20	100	4/ 02	0.30	0.11020	0.00242	7 57440	0.12010	0.32009	0.00402	2161	12	21001	0	2200	12
LINA4-27	271	94 24 E	0.49	0.134/4	0.00100	7 41205	0. 1992	0.400/9	0.00292	2101	10	2162	9 16	2142	10
IIRA4-28	3/1	240 107	0.00	0.13041	0.00235	7 51141	0.11050	0.39431	0.00509	2182	30	2103	10	2143	24
пкл4-29	230	101	0.80	0.13001	0.00112	1.01141	0.11820	0.39740	0.00440	4185	14	21/4	14	2107	20





Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images for representative zircons of two types of amphibolites

in Huanren area, eastern Liaoning Province



Fig. 4 Zircon U-Pb ages of two types of amphibolites in Huanren area, eastern Liaoning Province

2018)。前者年龄跨度较大,可能是由于基性岩岩浆 中锆石的 U-Pb 同位素在后期变质过程中易发生放 射性 Pb 丢失而造成年龄的偏低,这一区间的年龄 往往代表了辽吉造山带内基性岩浆岩的成岩年龄。 后者在带内所获得的数据最为集中,在花岗岩、酸性

火山岩以及基性火山岩中均有表现,代表了辽吉造 山带发生区域变质作用的时代。因此本次在两类斜 长角闪岩中获取的年龄2158±15 Ma、2173±12 Ma 可作为两类斜长角闪岩的成岩年龄,1870±6 Ma、 1861±7 Ma为变质峰期年龄。

3.2 主量元素特征

9件斜长角闪岩样品 SiO₂ 含量在 46.58%~ 49.96%之间,平均值 47.88%,属基性岩范畴。从 表 2 中可以看出,5 件样品具有较低的 TiO₂ 含量(5 件样品 TiO₂ 含量在 0.90%~1.34%之间,平均值 1.10%),与洋岛拉斑玄武岩或洋中脊玄武岩值相 近,而明显低于碱性洋岛玄武岩平均值(2.90%) (Sun et al., 1989), 4 件样品具有较高的 TiO₂ 含量 (4 件样品 TiO₂ 含量在 2.22%~2.49%之间,平均 值 2.35%)。据此将斜长角闪岩样品划分为两组: 第一组低 Ti 样品具有较高的 Al₂O₃ 含量(14.07% ~14.76%,平均值14.39%)、MgO含量(7.75%~ 8.45%,平均值 8.07%),较低的 TFeO 含量 (9.95%~12.11%,平均值11.27%)、K₂O含量 (0.72%~1.07%,平均值 0.82%);第二组高 Ti 样 品具有较低的 Al₂O₃ 含量(12.58%~12.95%,平 均值 12.74%)、MgO 含量(4.93%~5.30%,平均 值 5.11%), 较高的 TFeO 含量(15.72%~ 17.33%,平均值16.56%)、K2O含量(1.15%~ 1.19%,平均值1.17%),类似OIB组成,但TiO2含 量偏低。在 1000×Zr/TiO₂-Nb/Y 图解上(图 5a), 高 Ti 样品落入碱性玄武岩区域,低 Ti 样品落入亚 碱性玄武岩区域, Y-Zr 图解上(图 5b), 低 Ti 样品中 均落入拉斑系列区内。总体上高 Ti 样品的 P_2O_5 、 MnO、K2O含量比低 Ti 样品的高, 而大部分样品的 CaO、MgO 含量比低 Ti 样品低。两类斜长角闪岩 样品 Mg[#]在 35~60 之间,低于原生岩浆 Mg[#](68 ~75)(Wilson,1989),反映岩浆可能经历了一定程 度的结晶分异作用或同化混染了少量地壳物质,高 Ti样品较低 Ti 样品的 Mg[#] 值低,表明前者的岩浆 演化程度比后者高。

3.3 微量元素特征

5件低 Ti 样品 ΣREE 含量较低,变化范围 46.60×10⁻⁶~67.38×10⁻⁶,平均值 55.67×10⁻⁶, 远高于原始地幔的含量 (7.43×10^{-6}) ,也高于 N-MORB 型玄武岩(39.11×10⁻⁶),低于洋岛玄武岩 (198.96×10⁻⁶),而与 E-MORB 型玄武岩(49.09× 10⁻⁶)含量相当(Sun et al., 1989)。LREE/HREE 介于 3.60~4.43 之间,显示弱的轻稀土富集重稀土 亏损特征。轻重稀土元素分馏程度较强,(La/Yb)_N =2.70~4.00、(La/Sm)_N=1.59~1.92。在球粒陨 石标准化 REE 配分模式图(6a)上,样品表现出轻稀 土元素(LREE)富集的右倾型配分模式,具有 E-MORB 玄武岩稀土元素地球化学特征。低 Ti 样品 中 Zr、Hf 和 Nb 丰度值与 E-MORB (73×10^{-6} 、 2.03×10⁻⁶、8.30×10⁻⁶)较相近,而与低 Zr、Hf 和 Nb 丰度的岛弧型玄武岩和高 Zr、Hf 和 Nb 丰度的 洋岛玄武岩差别较大(Sun et al., 1989)。样品原始 地幔标准化微量元素配分曲线整体呈平坦微右倾型 分配模式(图 6b),轻微亏损 Nb、Ta、Zr,明显亏损 P,不同于轻稀土元素亏损、曲线左倾的 N-MORB 型,亦有别于表现为向上隆起特征的洋岛玄武岩,而 类似于 E-MORB 型玄武岩曲线形态。

4 件高 Ti 样品 ΣREE 含量明显高于低 Ti 样品 含量,变化范围 178.80×10⁻⁶~199.10×10⁻⁶,平 均值 189.39×10⁻⁶,高于原始地幔、洋中脊玄武岩,



图 5 辽东桓仁地区两类斜长角闪岩 1000×Zr/TiO₂-Nb/Y (a)(底图据 Winchester et al.,1977)和 Y-Zr (b)(底图据 Miyashiro et al.,1974)图解

Fig. 5 $1000 \times Zr/TiO_2$ -Nb/Y (a) (after Winchester et al. , 1977) and Y-Zr (b) (after Miyashiro et al. , 1974) diagrams for two types of amphibolites in Huanren area, eastern Liaoning Province

表 2 辽东桓仁地区两类斜长角闪岩主量(%)、微量元素(×10⁻⁶)分析结果

Table 2 Major element (%) and trace element (×10⁻⁶) data of two types of amphibolites in Huanren area, eastern Liaoning Province

岩石编号		低	Ti 型斜长角闪	1岩					
样号	CDG1	CDG2	CDG3	CDG4	CDG5	SLZ1	SLZ2	SLZ3	SLZ4
SiO_2	48.70	48.50	48.26	48.80	49.96	46.58	47.00	46.85	46.62
${\rm TiO}_2$	1.34	1.16	1.18	0.96	0.90	2.22	2.49	2.37	2.32
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	14.07	14.12	14.76	14.77	14.27	12.92	12.76	12.58	12.72
$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	1.28	1.29	1.72	1.70	1.40	3.60	2.81	3.20	3.30
FeO	10.94	10.65	10.56	8.88	8.69	14.09	13.19	13.57	13.78
MnO	0.19	0.17	0.17	0.18	0.20	0.32	0.29	0.31	0.27
MgO	7.99	8.25	7.75	7.95	8.43	5.30	4.93	4.95	5.25
CaO	10.40	10.87	10.70	10.51	10.35	8.78	9.78	9.68	9.22
Na_2O	2.31	2.05	2.34	3.00	2.63	2.70	3.00	2.80	2.90
K_2O	0.72	0.78	0.77	0.76	1.07	1.19	1.18	1.15	1.17
P_2O_5	0.03	0.05	0.05	0.08	0.07	0.31	0.29	0.28	0.30
烧失量	1.54	1.72	1.57	1.96	1.71	1.55	1.79	1.78	1.91
Total	99.51	99.61	99.83	99.55	99.68	99.56	99.51	99.52	99.76
TFeO	12.09	11.81	12.11	10.41	9.95	17.33	15.72	16.45	16.75
Mg [#]	56.24	57.87	55.67	57.89	60.40	35.28	35.86	34.91	35.85
Nb	8.80	7.90	7.73	6.79	6.32	29.10	32.50	31.70	30.10
Ga	19.6	17.7	17.8	14.7	14.5	23.5	23.8	23.5	23.3
Zr	81.3	79.1	77.6	75.3	76.6	225.0	221.0	234.0	223.0
Th	1.94	1.80	1.77	2.27	2.16	2.94	2.10	2.35	2.55
Sr	324	235	344	433	418	239	248	245	245
Ba	110	135	121	273	496	819	961	941	873
V	317	294	292	273	246	380	382	384	372
Co	53.9	51.8	49.0	49.4	45.8	60.1	66.1	65.7	63.2
Cr	178.0	282.0	182.0	357.0	329.0	72.4	64.0	67.3	70.5
Ni	85.1	99.8	77.3	67.9	56.8	49.7	50.3	50.5	49.8
Rb	38.9	41.1	41.6	28.9	36.3	31.0	25.5	26.8	27.5
Та	0.38	0.48	0.35	0.32	0.42	1.69	1.86	1.76	1.70
U	0.35	0.31	0.32	0.36	0.38	0.49	0.77	0.77	0.65
Hf	2.29	2.52	2.53	2.14	2.49	6.28	6.21	6.23	6.17
Pb	2.56	2.32	2.71	2.45	2.28	4.34	7.22	5.56	6.61
La	9.85	8.03	8.54	7.48	6.14	29.90	32.40	33.50	31.70
Ce	23.3	18.6	19.4	17.7	15.8	62.7	65.1	68.3	65.7
Pr	3.12	2.65	2.90	2.32	2.03	8.83	8.92	9.15	8.55
Nd	13.90	10.30	12.20	11.10	9.07	37.90	42.30	43.50	40.50
Sm	3.31	2.59	2.86	2.86	2.49	8.67	9.55	9.82	9.15
Eu	1.08	0.82	0.95	0.94	0.95	2.77	2.88	2.74	2.93
Gd	3.19	2.43	2.75	2.21	1.86	7.29	8.21	8.65	7.82
Tb	0.59	0.44	0.52	0.46	0.45	1.46	1.52	1.62	1.48
Dy	3.87	2.85	3.40	3.46	3.09	7.96	8.89	9.27	8.27
Ho	0.73	0.55	0.62	0.74	0.61	1.63	1.67	1.75	1.55
Er	2.07	1.53	1.81	1.94	1.91	4.31	4.67	4.82	4.52
Tm	0.31	0.24	0.27	0.31	0.29	0.63	0.69	0.72	0.67
Yb	1.77	1.44	1.61	1.81	1.63	4.09	4.40	4.55	4.24
Lu	0.29	0.22	0.24	0.29	0.28	0.66	0.72	0.71	0.67
Y	19.9	13.9	16.3	18.5	15.8	43.4	44.5	43.7	44.7
ΣREE	67.38	52.69	58.07	53.62	46.60	178.80	191.92	199.1	187.75
LREE	54.56	42.99	46.85	42.40	36.48	150.77	161.15	167.01	158.53
HREE	12.82	9.70	11.22	11.22	10.12	28.03	30.77	32.09	29.22
$\mathrm{La}_{\mathrm{N}}/\mathrm{Yb}_{\mathrm{N}}$	3.99	4.00	3.80	2.96	2.70	5.24	5.28	5.28	5.36
δEu	1.02	1.00	1.04	1.14	1.35	1.07	0.99	0.91	1.06
ðСе	1.03	0.99	0.96	1.04	1.10	0.95	0.94	0.96	0.98

注:测试单位为辽宁省地质矿产研究院;SLZ1、SLZ2、SLZ3、SLZ4为本次测得数据,其余样品数据据杨玉伟等,2020。



图 6 辽东桓仁地区两类斜长角闪岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) (OIB、E-MORB、N-MORB、球粒陨石及原始地幔标准化值均来自 Sun et al., 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE pstterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagram (b) of two types of amphibolites in Huanren area, eastern Liaoning Province (OIB, E-MORB, N-MORB, chondrite and primitive mantle are from Sun et al., 1989)

与洋岛玄武岩含量较接近。LREE/HREE介于 5.20~5.43之间,(La/Yb)_N=2.70~4.00)、(La/Sm)_N =1.59~1.92,显示轻重稀土元素分馏程度较强。 球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图呈现轻稀土元 素富集的右倾曲线,曲线左端明显高于 E-MORB, 显著不同于轻稀土亏损的 N-MORB,表现出 OIB 特 征。高 Ti 样品分析结果显示样品相对富集 Rb、 Th、U等大离子亲石元素,在原始地幔标准化微量 元素蛛网图上没有 Nb 和 Ta 负异常,曲线呈典型的 左侧单峰隆起形态,这种分布特征与典型的岛弧火 山岩和洋中脊火山岩均有较大区别,而与洋岛玄武 岩(OIB)的分布模式较为一致。所有样品 δEu 值范 围为 0.91~1.35,无明显的 Eu 异常,暗示岩浆形成 和演化过程中没有发生斜长石的分离结晶作用。

4 讨论

桓仁地区斜长角闪岩形成于古元古代,后期遭 受变形、变质作用改造,岩石发生了显著蚀变作用。 大离子亲石元素(Cs、Rb、Ba、K等)在玄武岩形成的 后期各种地质过程中表现出一定的活动性,不能代 表岩石的原始组成成分。高场强元素含量相对稳 定,基本不受后期蚀变作用的影响,可以反映源区特 征及岩石成岩过程。因此本文主要利用高场强元素 来讨论岩石陆壳混染、地幔源区物质组成特征及岩 石成因。

4.1 源区性质及岩石成因

两类斜长角闪岩样品在 Sm/Yb-Sm 图解上(图 7a)显示岩浆源区具有尖晶石二辉橄榄岩和石榴子 石二辉橄榄岩混合特征(高 Ti 样品为地幔源区 5% $\sim 10\%$ 部分熔融,低 Ti 样品为地幔源区 20%~ 30%部分熔融)(图 7),在(Tb/Yb)_N-(La/Sm)_N图 解上(图 7a),全部样品落入尖晶石稳定域内,说明 两类斜长角闪岩原岩以尖晶石二辉橄榄岩部分熔融 为主,为幔源岩浆产物。从表 2 中可以看出,高 T 斜长角闪岩样品中强不相容元素,如K、Ba、Nb、Sr、 Zr、La 等,明显高于低 Ti 样品,这些元素在上地幔 部分熔融过程中倾向于富集在液相中,并通过部分 熔融程度的增加而稀释。两类斜长角闪岩样品在强 不相容元素上的明显差异说明高 Ti 与低 Ti 斜长角 闪岩样品来源于上地幔不同程度的部分熔融,与 Sm/Yb-Sm 图解上(图 7a)反映的结果一致。尖晶 石和石榴子石是地幔中两个非常重要的矿物相,随 深度增加,稳定的尖晶石转变为尖晶石和石榴子石 共生,进而转变为石榴子石。这两种矿物对稀土元 素的分配系数具有明显差别, 重稀土元素 Yb 对于 石榴子石是强相容的,而对尖晶石是强不相容的,因 而岩浆岩中的 Tb/Yb 的高比值指示其形成深度大, 高 Ti 样品相比低 Ti 样品具有较高的 Tb/Yb 比值 (图 7b),显示前者相比后者的形成深度更深。

Nb/U比值是衡量岩石是否受到地壳物质的混染的重要标志,研究表明,地壳、原始地幔、N-MORB、E-MORB、OIB的Nb/U比值依次约为10、34、50、46、47(Sun et al.,1989),因此岩石Nb/U的值越接近10,越表明有地壳混染的痕迹,低Ti样品中Nb/U值为16~25,平均值22,高Ti样品的Nb/U值为41~59,平均47。岩浆中La/Sm比值和Th的含量随地壳物质的混染程度呈正比,两类斜长角闪岩样品La/Sm值为2.4~3.4,变化范围不大,低



图 7 辽东桓仁地区两类斜长角闪岩 Sm/Yb-Sm (a)(底图据 Aldanmaz et al.,2000)和(Tb/Yb)_N-(La/Sm)_N(b) (底图据 Furman et al.,2004)图解

Fig. 7 Sm/Yb-Sm (a) (after Aldanmaz et al., 2000) and (Tb/Yb)_N-(La/Sm)_N(b) (after Furman et al., 2004) diagrams of two types of amphibolites in Huanren area, eastern Liaoning Province

Ti 样品相比高 Ti 样品具有明显 Th 正异常(图 6b)。低 Ti 样品中 Sr 含量较高 Ti 样品明显富集, 与上地壳含量相当(低 Ti 样品 Sr 平均含量 350× 10⁻⁶)。从以上这些特征看,低 Ti 组样品原岩岩浆 受到了一定程度的地壳物质混染,高 Ti 组样品在成 岩过程中基本未受到地壳物质的混染。

Ta/Yb-Nb/Yb 和 Nb/Yb-La/Yb 图解常用来 区别地幔源区和岩浆上升过程中流体/熔体对微量 元素的贡献,未受后期过程影响的岩石应投影在地 幔序列里。在 Ta/Yb-Nb/Yb 和 Nb/Yb-La/Yb 图 解中(图 8),两类斜长角闪岩样品全部落入地幔序 列 E-MORB-OIB 过渡区域及其附近,低 Ti 样品靠 近 E-MORB 端元而高 Ti 样品更靠近 OIB 端元,表 明这些元素受岩浆源区的控制,后期过程影响有限。 结合两类斜长角闪岩样品地球化学特征(图 6),认 为低 Ti 斜长角闪岩具有 E-MORB 地球化学特征, 高 Ti 斜长角闪岩具有 OIB 地球化学特征。同时两 类斜长角闪岩样品轻微亏损 Zr 而没有明显的 Hf 亏损(图 6b),同样显示受到的流体交代作用有限, 因为 Zr 和 Hf 在流体中具有低的溶解度而在板片 熔体中则相反(La Flèche et al.,1998),如果有大量 与俯冲相关流体的交代,那么这些斜长角闪岩必然 会像俯冲带玄武岩那样亏损 Zr 和 Hf。

工作区内两类斜长角闪岩具有低的 MgO (5.25%~8.43%)、Mg[#](34.91~60.40)、Cr 和 N 值,表明岩浆不可能是直接来源于未分异的地幔橄



图 8 辽东桓仁地区两类斜长角闪岩 Th/Yb-Nb/Yb (a)(底图据 Pearce,2008)和 Th/Yb-Ta/Yb (b)(底图据 Pearce,2008)图解 Fig. 8 Th/Yb-Nb/Yb (a) (after Pearce, 2008) and Th/Yb-Ta/Yb (b) (after Pearce, 2008) diagrams of two types of amphibolites in Huanren area, eastern Liaoning Province

榄岩部分熔融,而是经过了在岩浆房中经历一定程 度的镁铁质矿物(如橄榄石和单斜辉石)的分离结晶 作用(Wilson, 1989)。从表 2 中可以看出, 两类斜长 角闪岩随 MgO 降低, Cr 和 Ni 含量明显降低, 表明 原始岩浆在上升过程中发生了明显的橄榄石和单斜 辉石分离结晶作用;同时两类斜长角闪岩中 CaO 的 含量较高、没有明显的负 Eu 异常,说明岩浆没有经 历过明显的斜长石分离结晶过程。两类斜长角闪岩 TiO_2 和 TFeO 含量呈明显的正相关(表 2),反映了 岩石中 Ti 可能主要赋存在铁钛氧化物中,铁钛氧化 物的分离结晶作用导致了岩浆中 TiO₂ 的降低 (Zhang Zhaochong, 2009)。区内高 Ti 斜长角闪岩 相比低 Ti 斜长角闪岩明显贫 MgO, TiO2 和 TFeO 含量明显升高,说明铁钛氧化物发生了一定程度的 堆晶/分离作用。镜下和人工重砂鉴定也显示区内 高 Ti 斜长角闪岩存在大量的磁铁矿和钛铁矿,而在 低Ti斜长角闪岩中铁钛氧化物含量往往较低。同 时 MgO 含量的降低与橄榄石和单斜辉石的分离结 晶有关,这些贫钛矿物的分离结晶作用也导致了晚 期岩浆 Ti 的富集(Zhang Zhaochong et al., 2004)。 综合以上分析可以看出,区内高 Ti 斜长角闪岩在岩 浆演化过程中主要分离结晶相为橄榄石和单斜辉 石,低 Ti 样品在岩浆演化过程中主要分离结晶相为 橄榄石、单斜辉石和铁钛氧化物。同位素测年结果 显示区内含 Ti 量不同的两类斜长角闪岩在空间上 并不存在时间分带(图4),应为同一母岩浆(尖晶石 二辉橄榄岩)通过不同矿物相分离结晶而产生,铁钛 氧化物的分离结晶作用是最主要的因素(Hao Yanl et al.,2004)。

4.2 构造环境讨论

地球化学特征显示区内低 Ti 斜长角闪岩样品 整体特征与 MORB 类似(图 6),同 MORB 相比更 富集 Cs、Rb、U、Ba、Th 等不相容元素(表 2),同时 又相对富集 LREE,具有一定程度的 Nb、Ta、Zr、Hf 亏损,类似于岛弧玄武岩的特征,在相关判别图解中 (图 9a)低 Ti 样品落入火山弧玄武岩和 MORB 区 内,显示低 Ti 斜长角闪岩兼具 MORB 和 IAB 的地 球化学特征。Woodhead et al. (1993)和 Gamble et al. (1994)在比较了岛弧玄武岩和弧后玄武岩的特 征后认为岛弧玄武岩比弧后玄武岩具有更低的 Nb 含量,通常岛弧玄武岩中 Nb 含量通常小于 2 µg/g (Pearce et al., 1995)。本文研究的所有斜长角闪岩 样品 Nb 的含量均大于 2 μg/g (表 2),同时样品在 形成过程中受到俯冲相关流体的交代作用有限,表 明其并非直接形成于岛弧环境。高 Ti 斜长角闪岩 样品落入了与洋岛玄武岩类似的板内构造背景(图 9a),由于区内高 Ti 斜长角闪岩并不具有洋岛环境 下由底部洋岛玄武岩和上部泥质沉积物(如碳酸盐 和硅质岩)组成的二元结构特点,同时图 9b 显示区 内斜长角闪岩形成于以陆壳为基底的拉张环境,暗 示高 Ti 样品虽然具有 OIB 地球化学特征,但可能 并非形成于洋岛环境。

两类斜长角闪岩原始岩浆来源于尖晶石二辉橄 榄岩的部分熔融,而尖晶石二辉橄榄岩稳定深度相



图 9 辽东桓仁地区两类斜长角闪岩 Hf/3-Th-Ta (a)(底图据 Vermeesch,2006)和 Ce/Nb-Th/Nb (b) (底图据 Sandeman et al.,2006)图解

Fig. 9 Hf/3-Th-Ta (a) (after Vermeesch, 2006) and Ce/Nb-Th/Nb (b) (after Sandeman et al., 2006) diagrams of two types of amphibolites in Huanren area, eastern Liaoning Province

IAB-岛弧玄武岩;MORB-洋中脊玄武岩;OIB-洋岛玄武岩

IAB-Island arc basalts; MORB-mid ocean ridge basalt; OIB-ocean island basalts

对较浅(图 7b),使其部分熔融需要高的热流值 (Géraldine et al., 2008),结合相关判别图解(图 10),区内两类斜长角闪岩应形成于伸展环境(弧后 环境和洋中脊环境),在伸展环境下,压力的降低有 利于岩石的熔融;同时,地壳的拉张减薄还可伴随深 部软流圈地幔的上涌和幔源岩浆的底侵作用,使地 壳加热而进一步发生部分熔融。两类斜长角闪岩样 品 Th/Ta 大于 1.6,显示其形成于板块汇聚边缘(Li Yongjun et al., 2015),低 Ti 样品落入大陆岩石圈 基底上产生的弧后盆地区内(图 9b),兼具 MORB 和IAB的地球化学特征也与弧后盆地玄武岩具有 相似的特征(Gill et al., 1976; Garci et al, 1979; Pearce et al., 1994; Chen Xiaojian et al., 2019),以 上皆暗示了两类斜长角闪岩形成构造背景更可能是 弧后环境,而不是洋中脊环境。大洋弧后盆地环境 出现的具有 E-MORB 和 OIB 特征玄武岩,并不是 真正意义上的 E-MORB 和 OIB,因为它们产出在汇 聚大陆边缘,而不是大洋里面,弧后盆地发展到后期 成熟阶段洋壳俯冲和板片回返作用,引起新的地幔 对流,使周围相对富集的地幔上涌发生部分熔融产 生 E-MORB 或 OIB(Hawkins, 2003)。研究区高家 峪组中两类斜长角闪岩附近的变质岩均为一套低角 闪岩相变质的陆缘碎屑岩,缺少火山碎屑岩物质,形 成于大洋岛弧环境的可能性不大。地球化学特征与 OIB 类似的高 Ti 斜长角闪岩在空间上并没有与厚

层碳酸盐岩相伴产出,与洋岛玄武岩/海山在物质组 成与结构上具有较大区别。笔者对区内辽河群变质 沉积岩中碎屑锆石进行了详细的年代学研究,结果 显示区内辽河群中变质沉积岩最主要的源区是辽吉 造山带内 2.20~1.96 Ga 的具有岛弧性质的岩浆岩 和华北太古宙古老基底的岩石,具有与弧后盆地沉 积类似的弧相关岩石和克拉通来源的二元源区组合 特征(Condie et al.,1993),明显不同于裂谷盆地沉 积特征。区内高家峪组中碎屑锆石以太古宙的年龄 信息为主、古元古代年龄信息稀少,同样表现为盆地 下沉出现较多周缘新太古代的源区信息。

综上笔者更倾向于区内两类斜长角闪岩可能形 成于弧后盆地环境。

5 地质意义

关于辽吉造山带构造演化模式一直以来存在争 议,但是无论是哪种模式,绝大多数学者都认可辽吉 造山带早期的构造环境为伸展减薄环境,对于何种 机制引起这一时期的伸展减薄作用还存在大陆裂谷 模式和弧后盆地扩张模式之争。后者强调俯冲作用 在辽吉造山带形成过程中的重要作用及意义,并且 龙岗陆块和狼林陆块在古元古代之前没有亲源性。 从目前的资料来看以往认为辽吉造山带两侧同属于 新太古代变质基底的狼林陆块、辽南陆块与龙岗陆 块,可能并不是由同一个太古宙克拉通裂解形成:辽



图 10 辽东桓仁地区两类斜长角闪岩 Nb×2-Zr/4-Y (a)(底图据 Meschede,1986)和 Ti-Zr (b)(底图据 Pearce,1982)图解 Fig. 10 Nb×2-Zr/4-Y (a) (after Meschede,1986) and Ti-Zr (b) (after Pearce,1982) diagrams of two types of

amphibolites in Huanren area, eastern Liaoning Province

A1一板内碱性玄武岩; A2一板内碱性玄武岩+板内拉斑玄武岩; B一富集型洋中脊玄武岩(E-MORB);

C—板内拉斑玄武岩+火山弧玄武岩; D—火山弧玄武岩

A1—Within-plate alkaline basalt; A2—within-plate alkaline basalt+ within-plate tholeiite; B—E-MORB;

C-within-plate tholeiite+volcanic arc basalt; D-volcanic arc basalt

南太古宙基底仅仅局限于最东南端的金州一庄河一 带,以往认为的辽南太古宙基底的分布范围被明显 夸大了;龙岗陆块和辽南陆块在岩石组合、年代学和 变质特征上明显不同,可能并非来自同一个太古宙 克拉通裂解形成;狼林陆块保存了大量的古元古代 岩浆、变质事件的记录(Zhao et al., 2006; Zhai et al.,2007;Wu et al.,2007a,2007b),仅在临津江一 带有确切太古宙基底年龄的报道(Zhao et al., 2006)。以上暗示辽吉造山带真实展布范围比现在 所认为的要大,辽吉造山带的形成演化可能并非与 陆内裂谷的闭合有关。越来越多的证据显示辽吉造 山带古元古代早期(~2.1 Ga)与洋壳俯冲有关的岩 浆活动分布十分广泛,如辽吉造山带内广泛分布的 辽吉花岗岩显示俯冲成因,是辽吉古元古代活动带 早期活动陆缘弧后盆地扩张阶段的产物(Wang Huichu et al., 2015; Song Yunhong et al., 2016; Wang Xiangjian et al., 2017; Ren Yunwei et al., 2017);在辽吉造山带北侧连山关一河栏镇一带出露 大规模的基性岩墙群,其地球化学特征类似于 MORB,明显不同于弧玄武岩和板内玄武岩,岩石在 形成过程中受到有限的俯冲相关流体交代作用和明 显的地壳混染作用,它们应是相对成熟弧后盆地的 产物(Xu Wang et al., 2017); 草河口地区出露的辽 河群斜长角闪岩具有岛弧拉斑玄武岩系列特点,形 成环境应为弧后盆地背景(Wang Huichu et al., 2011)。同时前人的研究显示辽吉造山带内的古元 古代变质火山岩和辽吉花岗岩多数具有岛弧钙碱性 火山岩特征(Lu Xiaoping et al., 2004; Li Chao et al., 2017; Li Zhuang et al., 2015; Meng En et al., 2017),两者代表了古元古代时期一个与俯冲带有关 的板块边缘,其出露位置可以近似代表古元古代大 陆弧的位置。本次在辽东桓仁地区获得的两类古元 古代斜长角闪岩,地球化学特征类似于 E-MORB 和 OIB,产出于汇聚大陆边缘的弧后盆地环境,综合区 域已有的资料认为辽吉造山带在古元古代早期(~ 2.1 Ga)处于大陆弧后盆地构造环境,辽吉造山带曾 经出现过与俯冲碰撞有关的构造演化过程,不支持 单一裂谷模式的观点。辽吉造山带造山过程中发生 洋中脊俯冲的位置可能远在东部陆块东南,并不位 于辽吉造山带内,古元古代大陆弧在辽吉造山带内 大致沿海城一宽甸呈北东向展布,一直可以延伸到 朝鲜半岛,辽吉地区在古元古代早期处于鲜岛弧(大 陆边缘弧)的弧后区域(Peng et al., 2014)。古元古 代早期(2.2~2.1 Ga),来自东部陆块移动的洋壳持

续俯冲与后撤导致弧后不断伸展,进而导致这一期 间辽吉弧后盆地的产生,弧后伸展作用促发了区内 这期基性岩浆活动。本次工作从两类斜长角闪岩样 品中同时获得了 1.87~1.86 Ga 的变质年龄,该年 龄在东部陆块中普遍存在(Zhang Shaohua et al., 2019;Feng Juanping et al.,2020),被认为是弧-陆 碰撞过程中辽河群以及带内花岗岩-基性岩侵入体 达到峰期的变质时代,为最终形成统一的华北克拉 通基底的反映。

6 结论

(1) 辽东桓仁地区高家峪组中斜长角闪岩可分 为高 Ti 型和低 Ti 型两组。高 Ti 型和低 Ti 型斜长 角闪岩分别获得了 2158±15 Ma、2173±12 Ma 的 成岩年龄和 1870±6 Ma、1861±7 Ma 的变质年龄。

(2) 辽东桓仁地区高家峪组中高 Ti 型斜长角闪 岩属碱性玄武岩,具有 OIB 地球化学特征;低 Ti 型 斜长角闪岩属拉斑玄武岩,兼具 E-MORB 和 IAB 地球化学特征。地球化学特征显示,含 Ti 量不同的 两类斜长角闪岩原岩不是尖晶石二辉橄榄岩不同程 度部分熔融形成的原生岩浆,而是原生岩浆经历了 不同矿物相分离结晶作用的产物。

(3) 辽东桓仁地区高家峪组中两类斜长角闪岩 形成于弧后盆地环境, 辽吉造山带的形成与弧-陆碰 撞有关。

注 释

- ❶ 辽宁省地质矿产局. 1989. 辽宁省区域地质志.
- ❷ 吉林省地质矿产局. 1988. 吉林省区域地质志.

References

- Aldanmaz E, Pearce J A, Thirlwall M F, Mitchell J G. 2000. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 102: 67~95.
- Bai Jin, Huang Xueguang, Dai Fengyan, Wu Changhua. 1993. Precambrian Crustal Evolution of China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Chen Bin, Li Zhuang, Wang Jialin, Zhang Lu, Yan Xuelong. 2016. Liaodong Peninsula ~2.2 Ga magmatic event and its geological significance. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 46(2): 303~320 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaojian, Yang Jingsui, Dong Yufei, Xiong Fahui, Lu Yuxiao, Li Guanlong, Bo Rongzhong. 2019. Genesis and tectonic environment of basaltic rocks from the Dongqiao ophiolite in Tibet. Acta Geologica Sinica, 93(10): 2509~2530 (in Chinese with English abstract).
- Dong Chunyan, Ma Mingzhu, Liu Shoujie, Xie Hangqiang, Liu Dunyi, Li Xuemei, Wan Yusheng. 2012. 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. Acta Petrologica Sinica, 28(9): $2785 \sim 2792$ (in Chinese with English abstract).

- Feng Juanping, Ouyang Zhengjian, Ma Haiyong, Fan Mengmeng, Ma Jing. 2020. U-Pb chronology, geochemical characteristics and significance of the Taojiayao basic dike swarms in the Zhongtiao Mountain, southeastern margin of North China Craton. Acta Geologica Sinica, 94(2): 573~586 (in Chinese with English abstract).
- Furman T Y, Bryce J G, Karson J, Lotti A. 2004. East African rift system (EARS) plume structure: insights from Quaternary mafic lavas of Turkana, Kenya. Journal of Petrology, 45(5): 1069~1088.
- Gamble J A, Wright I C, Woodhead J D, McCulloch M T. 1994. Arc and backarc geochemistry in the southern Kermadec arc-Ngatoro basin and off shore Taupo volcanic zone, SW Pacific. Geological Society, London, Special Publications, 81: 193 ~212.
- Géraldine H, Jean-Philippe E, Bernardo B, Erwan B, Michel F, Jo C. 2008. Geochemical and petrological constraints on rear-arc magma genesis processes in Ecuador: the Puyo cones and Mera lavas volcanic formations. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 176: 107~118.
- Gill J B. 1976. Composition and age of Lau Basin and Ridge volcanic rocks: implications for evolution of an interarc basin and remnant arc. Geological Society of America Bulletin, 87(10): 1384~1395.
- Hao Defeng, Li Sanzhong, Zhao Guochun, Sun Min, Han Zhongzhu, Zhao Guangtao. 2004. Origin and its constraint to tectonic evolution of Paleoproterozoic granitoids in the eastern Liaoning and Jilin Provinces, North China. Acta Petrologica Sinica, 20(6): 1409~1416 (in Chinese with English abstract).
- Hao Yanli, Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Mahoney J J. 2004. Petrogenesis of high-Ti and low-Ti basalts from the Emeishan large igneous province. Geological Review, 50(6): 587~592 (in Chinese with English abstract).
- Hawkins J W. 2003. Geology of supra-subduction zones: implications for the origin of ophiolites. In: Dilek Y, Newcomb S, eds. Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought. Geological Society of America Special Paper, 373(0): 227~268.
- Li S Z, Zhao G C, Sun M, Han Z Z, Luo Y, Hao D F, Xia X P. 2005. Deformation history of the Paleoproterozoic Liaohe assemblage in the eastern block of the North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 24(5): 659~674.
- Li S Z, Zhao G C, Santosh M, Liu X, Dai L M. 2011. Palaeoproterozoic tectonothermal evolution and deep crustal processes in the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton: a review. Geological Journal, 46(6): 525~543.
- Li Z Y, Li Y L, Wijbrans J R, Yang Q J, Qiu H N, Brouwer F M. 2018. Metamorphic P-T path differences between the two UHP terranes of Sulu orogen, eastern China: petrologic comparison between eclogites from Donghai and Rongcheng. Journal of Earth Science, 29(5): 1150~1166.
- Li Yongjun, Li Ganyu, Tong Lili, Yang Gaoxue, Wang Ran. 2015. Discrimination of ratios of Ta, Hf, Th, La, Zr and Nb for tectonic settings in basalts. Journal of Earch Sciences and Environment, (3): 14~21 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhuang, Chen Bin, Liu Jingwei, Zhang Lu, Yang Chuan. 2015. Zircon U-Pb ages and their implications for the South Liaohe Group in the Liaodong Peninsula, Northeast China. Acta Petrologica Sinica, 31 (6): 1589 ~ 1605 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongda, Bing Zhibo, Dong Jingchao. 1989. Features and significance of marine tholeiite of Early Proterozoic in Liaodong Peninsula. Liaoning Geology, (4): 289~297 (in Chinese with English abstract).
- Lu Xiaoping, Wu Fuyuan, Lin Jingqian, Sun Deyou, Zhang Yanbin, Guo Chunli. 2004. Geochronological successions of the early Precambrian granitic magmatism in southern Liaodong

Peninsula and its constraints on tectonic evolution of the North China Craton. Chinese Journal of Geology, 39(1): $123 \sim 138$ (in Chinese with English abstract).

- Lu Xiaoping, Wu Fuyuan, Guo Jinghui, Yin Changjian. 2005. Late Paleoproterozoic granitic magmatism and crustal evolution in the Tonghua region, Northeast China. Acta Petrologica Sinica, 21 (3): 721~736 (in Chinese with English abstract).
- Ma Lijie, Cui Yingchun, Liu Junlai, Zhang Junbo. 2007. Geochemical characteristics and the tectonic setting of amphibolites of the North Liaohe Group in Liaodong area. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 30(4): 515~524 (in Chinese with English abstract).
- Meng E, Liu F L, Liu P H, Liu C H, Yang H, Wang F, Shi J R, Cai J. 2014. 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. Precambrian Research, 247: 92~109.
- Meng En, Wang Chaoyang, Liu Chaohui, Shi Jianrong, Li Yanguang. 2017. Geochronology, petrogenesis and constraints on regional tectonic evolution of the meta-volcanic rocks in southeastern Liaodong Peninsula. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 47(6): 1589~1619 (in Chinese with English abstract).
- Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. American Journal of Science, 274(4): 321 \sim 355.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe R S, ed. Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks. John Wiley and Sons, 252~548.
- Pearce J A. 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. Lithos, 100, 14~48.
- Pearce J A, Ernewein M, Bloomer S H, Parson L, Murton B J, Johnson L E. 1994. Geochemistry of Lau Basin volcanic rocks: Influence of ridge segmentation and arc proximity. Geological Society, London, Special Publications, 81(1): 53~75.
- Pearce J A, Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences, 23: 251~286.
- Peng P, Wang X P, Windley B F, Guo J H, Zhai M G, Li Y. 2014. Spatial distribution of ~1950~1800 Ma metamorphic events in the North China Craton: implications for tectonic subdivision of the craton. Lithos, 202~203: 250~266.
- Qin Ya, Liang Yihong, Zhang Qingwei, Bai Lingan, Zou Cunming. 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of plagioclase amphibolite from Shensixian mafic dyke swarm in Liaodong area, China and its significance. Acta Mineralogica Sinica, 35(4): 540~544 (in Chinese with English abstract).
- Ren Yunwei, Wang Huichu, Kang Jianli, Chu Hang, Tian Hui. 2017. Paleoproterozoic magmatic events in the Hupiyu area in Yingkou, Liaoning Province and their geological significance. Acta Geologica Sinica, 91(11): 2456~2472 (in Chinese with English abstract).
- Sandeman H A, Hanmer S, Tella S, Armitage A A, Davis W J, Ryan J J. 2006. Petrogenesis of Neoarchaean volcanic rocks of the MacQuoid supracrustal belt: a back-arc setting for the northwestern Hearne subdomain, western Churchill Province, Canada. Precambrian Research, 144(1~2): 140~165.
- Song Yunhong, Yang Fengchao, Yan Guolei, Wei Minghui, Shi Shaoshan. 2016. SHRIMP U-Pb ages and Hf isotopic compositions of Paleoproterozoic granites from the eastern part of Liaoning Province and their tectonic significance. Acta Geologica Sinica, 90(10): 2620~2636 (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

第 12 期

 $(1): 313 \sim 345.$

- Wang Huichu, Lu Songnian, Chu Hang, Xiang Zhenqun, Zhang Chagjie, Liu Huan. 2011. Zircon U-Pb age and tectonic setting of meta-basalts of Liaohe Group in Helan area, Liaoyang, Liaoning Province. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 41(5):1322~1334, 1361 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huichu, Ren Yunwei, Lu Songnian, Kang Jianli, Chu Hang, Yu Hongbin, Zhang Chagjie. 2015. Stratigraphic units and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liao-Ji orogeny. Acta Geoscientica Sinica, 36(5): 583~598 (in Chinese with English abstract).
- Wang X P, Peng P, Wang C, Yang S Y. 2016. Petrogenesis of the 2115 Ma Haicheng mafic sills from the eastern North China Craton: implications for an intra-continental rifting. Gondwana Research, 39: 347~364.
- Wang Xiangjian, Liu Jianhui, Ji Lei. 2017. Zircon U-Pb chronology, geochemistry and their petrogenesis of Paleoproterozoic monzogranitic gneisses in Kuandian area, eastern Liaoning Province, Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 33 (9): 2689 ~ 2707 (in Chinese with English abstract).
- Wilson M. 1989. Igneous Petrogenesis. London: Chapman & Hall, $1\!\sim\!466.$
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20(4): 325~343.
- Woodhead J, Eggins S, Gamble J. 1993. High field strength and transition element systematics in island arc and back-arc basin basalts: evidence for multi-phase melt extraction and a depleted mantle wedge. Earth and Planetary Science Letters, 114: 491~ 504.
- Wu F Y, Han R H, Yang J H, Wilde S A, Zhai M G, Park S C. 2007a. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. Chemical Geology, 238(3~4): 232~248.
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Liu X M, Guo J H, Zhai M G. 2007b. Detrital zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the crustal evolution of North Korea. Precambrian Research, 159(3 ~4): 155~177.
- Xu W, Liu F L, Tian Z H, Liu L S, Ji L, Dong Y S. 2018. Source and petrogenesis of Paleoproterozoic meta-mafic rocks intruding into the North Liaohe Group: implications for back-arc extension prior to the formation of the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton. Precambrian Research, 307: 66~81.
- Xu Wang, Liu Fulai, Liu Chaohui. 2017. Petrogenesis and geochemical characteristics of the North Liaohe metabasic rocks, Jiao-Liao-Ji orogenic belt and their tectonic significance. Acta Petrologica Sinica, 33(9): 2743~2757 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yuwei, Yu Chao, Su Te, Dong Yang, Wang Guangwei, Tian Yi, Bao Dongming. 2020. Petrogenesis of the Liaohe Group from the Heigou area in the eastern Liaoning Province: constraints on tectonic evolution of the Liao-Ji orogenic belt. Acta Geologica Sinica, 94(5): 1397~1412 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jiejiang, Yang Debin, Feng Hong, Lan Xiang. 2007. Chronology of amphibolite protolith in Haicheng of southern Liaoning: evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb dating. Global Geology, 26 (4): 391 ~ 396, 408 (in Chinese with English abstract).
- Zhai M G, Guo J H, Li Z, Chen D Z, Peng P, Li T S, Hou Q L, Fan Q C. 2007. Linking the Sulu UHP belt to the Korean Peninsula: evidence from eclogite, Precambrian basement, and Paleozoic sedimentary basins. Gondwana Research, 12(4): 388 ~403.
- Zhang Qiusheng. 1988. Early Crust and Mineral Deposits of Liaodong Peninsula. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).

- Zhang Shaohua, Zhang Ruiying, Zhou Jinyu. 2019. LA-ICP-MS zircon U-Pb age, geochemical characteristics of the Paleoproterozoic metamorphosed mafic dykes in Zhongtiao Mountains, Shanxi Province, and their geological implications. Geological Review, 65(6): $1350 \sim 1362$ (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong. 2009. A discussion on some important problems concerning the Emeishan large igneous province. Geology in China, 36(3): 634~646 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Hao Yanli, Mahoney J J. 2004. Geochemistry of the picrites and associated basahs from the Emeishan large igneous basalt province and constraints on their source region. Acta Geologica Sinica, 78(2): 171~180 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Cao L, Wilde S A, Sun M, Choe W J, Li S Z. 2006. Implications based on the first SHRIMP U-Pb zircon dating on Precambrian granitoid rocks in North Korea. Earth and Planetary Science Letters, 251(3~4): 365~379.
- Zhao G C, Cawood P A, Li S Z, Wilde S A, Sun M, Zhang J, He Y H, Yin C Q. 2012. Amalgamation of the North China Craton: key issuesand discussion. Precambrian Research, 222~223: 55 ~76.
- Zhao G C, Zhai M G. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: review and tectonic implications. Gondwana Research, 23(4): 1207~1240.

参考文献

- 白瑾,黄学光,戴凤岩,吴昌华.1993.中国前寒武纪地壳演化.北京: 地质出版社.
- 陈斌,李壮,王家林,张璐,鄢雪龙.2016.辽东半岛~2.2Ga 岩浆事件 及其地质意义.吉林大学学报(地球科学版),46(2):303~320.
- 陈晓坚,杨经绥,董玉飞,熊发挥,卢雨潇,李观龙,薄容众.2019.西 藏东巧蛇绿岩中玄武质岩石成因和构造背景探讨.地质学报, 93(10):2509~2530.
- 董春艳,马铭株,刘守偈,颉顽强,刘敦一,李雪梅,万渝生.2012.华 北克拉通古元古代中期伸展体制新证据:鞍山一弓长岭地区变 质辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年和全岩地球化学.岩石学 报,28(9):2785~2792.
- 冯娟萍,欧阳征健,马海勇,范萌萌,马静.2020.华北克拉通东南缘 中条山陶家窑基性岩墙群 U-Pb 定年、地球化学特征及其构造 环境.地质学报,94(2):573~586.
- 郝德峰,李三忠,赵国春,孙敏,韩宗珠,赵广涛.2004.辽吉地区古元 古代花岗岩成因及对构造演化的制约.岩石学报,20(6):1409 ~1416.
- 郝艳丽,张招崇,王福生,Mahoney J J. 2004. 峨眉山大火成岩省"高 钛玄武岩"和"低钛玄武岩"成因探讨. 地质论评,50(6):587 ~592.
- 李永军,李甘雨,佟丽莉,杨高学,王冉.2015. 玄武岩类形成的大地 构造环境 Ta、Hf、Th、La、Zr、Nb 比值对比判别. 地球科学与环 境学报,(3):14~21.
- 李壮,陈斌,刘经纬,张璐,杨川.2015. 辽东半岛南辽河群锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 岩石学报,31(6):1589~1605.
- 刘永达,邴志波,董景超.1989.辽东半岛早元古宙海相拉斑玄武岩 特征及其意义.辽宁地质,(4):289~297.
- 路孝平,吴福元,林景仟,孙德有,张艳斌,郭春丽.2004. 辽东半岛南 部早前寒武纪花岗质岩浆作用的年代学格架. 地质科学,39 (1):123~138.
- 路孝平,吴福元,郭敬辉,殷长建.2005.通化地区古元古代晚期花岗 质岩浆作用与地壳演化.岩石学报,21(3):721~736.
- 马立杰,崔迎春,刘俊来,张俊波.2007. 辽东北辽河群斜长角闪岩的 地球化学特征及构造背景.山西大学学报(自然科学版),30 (4):515~524.
- 孟恩,王朝阳,刘超辉,施建荣,李艳广.2017.辽东半岛东南部南辽 河群变质火山岩的时代、成因及其对区域构造演化的制约.吉 林大学学报(地球科学版),47(6):1589~1619.
- 秦亚,梁一鸿,张青伟,白令安,邹存铭. 2015. 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. 矿物学报,35(4):540~544.

- 任云伟,王惠初,康健丽,初航,田辉.2017.辽宁营口虎皮峪地区古 元古代岩浆事件及地质意义.地质学报,91(11):2456~2472.
- 宋运红,杨凤超,闫国磊,魏明辉,石绍山.2016.辽东地区古元古代 花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及构造意义.地质 学报,90(10):2620~2636.
- 王惠初,陆松年,初航,相振群,张长捷,刘欢.2011. 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. 吉林 大学学报(地球科学版),41(5):1322~1334,1361.
- 王惠初,任云伟,陆松年,康健丽,初航,于宏斌,张长捷.2015.辽吉 古元古代造山带的地层单元划分与构造属性.地球学报,36 (5):583~598.
- 王祥俭,刘建辉,翼磊.2017.胶-辽-吉带辽东宽甸地区古元古代二长 (正长)花岗质片麻岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成因.岩 石学报,33(9):2689~2707.
- 许王,刘福来,刘超辉. 2017. 胶-辽-吉造山带北辽河变基性岩的成

- 因、地球化学属性及其构造意义. 岩石学报,33(9):2743~2757.
- 杨玉伟,余超,苏特,董洋,王广伟,田毅,鲍东明.2020. 辽东黑沟地 区辽河群成因及其对辽吉造山带构造演化的制约.地质学报, 94(5):1397~1412.
- 于介江,杨德彬,冯虹,兰翔.2007.辽南海城斜长角闪岩原岩的形成 时代:锆石 LA-ICP-MSU-Pb 定年证据.世界地质,26(4):391 ~396,408.
- 张秋生.1988. 辽东半岛早期地壳与矿床.北京:地质出版社,276 ~331.
- 张少华,张瑞英,周金昱.2019. 中条山地区古元古代变基性岩墙的 地球化学特征、LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义. 地质论 评,65(6): 1350~1362.
- 张招崇. 2009.关于峨眉山大火成岩省一些重要问题的讨论.中国地质,36(3):634~646.
- 张招崇,王福生,郝艳丽. 2004. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共 生岩石的地球化学特征及其对源区的约束. 地质学报,78(2): 171~180.

Chronology, geochemical characteristics and geological significance of the two types of amphibolites within the Liaohe Group in the eastern block of the North China Craton

YANG Yuwei¹⁾, YU Haifeng¹⁾, SHI Yuxue¹⁾, WU Qi¹⁾, SUN Haiyang¹⁾, HAN Xue¹⁾, ZHANG Yanlong¹⁾, YU Chao^{*2)}

1) Geophysical Measuring Exploration Institute of Liaoning Province, Shenyang, Liaoning 110031, China;

2) Liaoning Survey Academy of Geology and Mineral Resources Investigation, Shenyang, Liaoning 110031, China

* Corresponding author: 286149526 @qq. com

Abstract

Petrology, geochemistry and zircon U-Pb chronology of the amphibolite in the Gaojiayu Formation of the Liaohe Group in the Huanren area, eastern Liaoning Provincewere studied. The results show that the original rock of amphibolite is basalt and can be divided into two types; low Ti and high Ti. The original rock of the low-Ti sample belongs to tholeiite series, with slight loss of Nb, Ta and Zr, obvious loss of P, and weak light rare earth elements enrichment, heavy rare earth elements loss, showing the geochemical characteristics of E-MORB. The original rock of the high Ti sample belongs to alkaline basalt series, with enrichment of large ionic lithophile elements such as Rb, Th and U, and enrichment of rare earth and loss of heavy rare earth, showing the geochemical characteristics of OIB. The two types of amphibolites have low contents of MgO, Cr, Ni and Mg[#] values, indicating that their protoliths are not primitive magma, but were formed by separate crystallization of different mineral phases. The U-Pb dating of zircon indicates that the diagenetic ages of the low Ti type and the high Ti type are 2158 ± 15 Ma and 2173 ± 12 Ma, and the metamorphic ages are 1870 ± 6 Ma and 1861 ± 7 Ma respectively. There are obvious differences in the geochemical characteristics of the two types of amphibolite indicating that there is no transitional relationship between them. The regional geological characteristics and petrogenetic studies jointly indicate that the two types of plagioclase were formed in the back-arc basin environment. Based on the available petrology, geochemistry and isotopic characteristics, the Liaoji area may have been in the tectonic environment of the back-arc basin of the active continental margin in the early Paleoproterozoic, and the formation of the Liaoji orogenic belt is related to the arc-land collision.

Key words: Liaohe Group; zircon U-Pb chronology; amphibolite; back-arc basin; Liao-Ji belt