

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.185>



# 辽宁半岛隆昌地区~2 113 Ma 变辉长岩地球化学与 Hf 同位素研究:对胶辽吉造山带构造演化的制约

赵 岩<sup>1,2</sup>,寇林林<sup>1,2</sup>,张 朋<sup>1,2</sup>,毕中伟<sup>1,2</sup>,李东涛<sup>1,2</sup>,陈 聪<sup>1,2</sup>

1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心,辽宁沈阳 110034

2. 东北地质科技创新中心,辽宁沈阳 110034

**摘要:**辉长岩的成岩时代、成因等研究对限定胶辽吉造山带构造背景等关键问题具有重要意义。对其开展详细的岩石地球化学分析、全岩 Nd 同位素和锆石 U-Pb 测年及原位 Hf 同位素分析,结果显示样品受蚀变影响不大,TiO<sub>2</sub> 含量较低(<1.31%),FeO<sup>T</sup>(11.91%~14.25%)、MgO(6.88%~7.62%)含量不高,K<sub>2</sub>O 含量中等偏高(0.85%~1.23%),属钙碱性-高钾钙碱性岩浆系列,岩石轻重稀土分馏不明显,富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素,亏损高场强元素 P、Hf 等,岩石相对富集 Nd 同位素,ε<sub>Nd(t)</sub> 值介于-1.6~2.6,(<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>i</sub> 比值变化于 0.281 497~0.281 612 之间,ε<sub>Hf(t)</sub> 值变化于 2.2~6.3 之间,模式年龄 t<sub>DM1</sub>(Hf) 值介于 2.25~2.33 Ga。多种特征元素地球化学图解显示辉长岩具有 E-MORB 特征,与裂谷构造环境中产出的 MORB 和 OIB 不同。研究认为胶辽吉造山带在~2.1 Ga 已存在洋壳俯冲,并可能已存在古岛弧,造山带演化过程中存在弧陆碰撞。

**关键词:**华北克拉通;胶辽吉造山带;隆昌地区;古元古代;变质辉长岩;地球化学。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2019)10-3333-13

收稿日期: 2019-07-29

## Characteristics of Geochemistry and Hf Isotope from Meta-Gabbro in Longchang Area, Liaodong Peninsula: Implications on Evolution of the Jiao-Liao-Ji Paleoproterozoic Orogenic Belt

Zhao Yan<sup>1,2</sup>, Kou Linlin<sup>1,2</sup>, Zhang Peng<sup>1,2</sup>, Bi Zhongwei<sup>1,2</sup>, Li Dongtao<sup>1,2</sup>, Chen Cong<sup>1,2</sup>

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

2. Northeast China Center for Geoscience and Innovation, Shenyang 110034, China

**Abstract:** The meta-gabbro, distributed in the Longchang area, eastern part of the North China craton, yields a zircon U-Pb age of 2 113±15 Ma by LA-ICP-MS. Detailed geochemistry analyses, whole rock Nd isotope and zircon U-Pb and in-situ Hf isotope analyses were made to confine tectonic settings of the Jiao-Liao-Ji orogenic belt and other crucial problems. The gabbro samples studied show calc-alkaline to high potassiac alkaline series features with weak alteration and also low content of TiO<sub>2</sub>(<1.31%), moderate content of MgO (6.88%~7.62%), FeO<sup>T</sup> (11.91%~14.25%) and K<sub>2</sub>O (0.85%~1.23%). The studied samples are characterized with low REE content and show weak REE fractionation and depletion in high field strength elements like P and Hf. The samples also show enrichment in large ion lithophile elements like Rb, Ba and K, and enrichment in Nd isotope content, with ε<sub>Nd(t)</sub> values of -1.6 to 2.6. (<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>i</sub> of zircon from the meta-gabbro samples ranging from 0.281 497 to 0.281 612, and the

**基金项目:**国家重点研发计划项目(Nos.2018YFC0603804, 2016YFC0600108);中国地质调查局项目(Nos.DD20190156, DD20190042-03).

**作者简介:**赵岩(1985—),男,工程师,主要从事辽东地区造山作用与成矿。ORCID: 0000-0002-0982-0211. E-mail:cugzhaoyan@126.com

**引用格式:**赵岩,寇林林,张朋,等,2019.辽宁半岛隆昌地区~2 113 Ma 变辉长岩地球化学与 Hf 同位素研究:对胶辽吉造山带构造演化的制约.地球科学,44(10):3333~3345.

calculated  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values ranging from 2.2 to 6.3. The calculated Hf modal ages are 2.25 to 2.33 Ga. Several crucial diagrams from meta-gabbro sample analysis results show far distance from MORB or OIB both of which are typical basalts distributed in a rift geological setting. E-MORB with continental crust component mixed in may be the exact origin of the meta-basalts in the Longchang area. It can be concluded that there was ocean crust subduction in  $\sim 2.1$  Ga within the Jiao-Liao-Ji orogenic belt, with possible paleo-arc and the evolution model of the Jiao-Liao-Ji orogenic belt is more like an arc-continental collision model.

**Key words:** North China craton; Jiao-Liao-Ji orogenic belt; Longchang area; Paleoproterozoic; meta-gabbro; geochemistry.

## 0 引言

辽东地区古元古代构造背景是近年来地质学家研究的热点之一,近年来研究取得了诸多进展,虽认可了胶辽吉造山带的存在,但造山带演化早期构造背景却存在很大争议。从早期一些学者根据辽河群内岩石组合特征(A型花岗岩、“双峰式火山岩”等)和硼矿等特殊矿产,认为其形成于裂谷环境(张秋生,1988;李三忠等,2001;Li *et al.*, 2006;陈井胜等,2017),近期持该观点的学者倾向认为胶辽吉造山带经历了从早期裂谷到晚期碰撞造山的演化模式(Cheng *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017; 杨崇辉等, 2018; Zou *et al.*, 2018);而另有学者根据变质岩顺时针 P-T-t 轨迹、高压麻粒岩、S型花岗岩及岩石地球化学特征等识别出古元古代岛弧等地质单元,认为其产出于弧陆碰撞构造背景下(白瑾,1993;路孝平等,2004;王惠初等,2011; Li and Chen, 2014; Meng *et al.*, 2014; 李壮等,2015; Liu *et al.*, 2017; 陈爽等,2018)。

鞍山、辽阳一带产出一系列与古元古代辽河群变质沉积岩系关系密切的变质基性岩(脉),包括辉长岩、辉绿岩脉、石榴斜长角闪岩和斜长角闪岩等,变质基性岩的岩石地球化学特征与同位素研究对于揭示本地区古元古代造山带演化过程具有重大意义。前人(董春艳等,2012;秦亚等,2015; Wang *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2018)分别在鞍山弓长岭、辽阳河栏镇以南、海城什司县等地开展变质基性岩研究,获得了一系列新的变质基性岩年龄,基本认为基性岩发生变质时间在 $\sim 1919$  Ma 至 $\sim 1870$  Ma 之间,与胶辽吉造山带内广泛的变质作用时间一致;变质基性岩形成时代限定在 $\sim 2130$  Ma 至 $\sim 2110$  Ma 之间。但在基性岩成因及其产出的构造环境等问题仍存在争议,Wang *et al.*(2016)认为变质基性岩由太古代古老俯冲板片重熔而来, $\sim 2110$  Ma 基性岩的产出不能代表存在同期俯冲带;而 Xu *et al.*(2018)则持相反观点,认为其研究对

象具有拉斑玄武岩特征,代表古元古代岛弧玄武岩并识别出俯冲带的其他特征。

本次研究选取了辽东半岛隆昌地区出露的变辉长岩为研究对象,根据野外产状与室内观察,认为蚀变尚不强烈,开展岩石地球化学含量分析,并利用热电离质谱仪、LA-ICP-MS、LA-MC-ICP-MS 等手段进行 Nd 同位素、锆石 U-Pb 和 Hf 同位素分析,以此探讨变辉长岩成因及产出的构造背景。

## 1 区域地质概况与隆昌地区变质辉长岩特征

胶辽吉造山带是华北克拉通东部一条近南北—北东方向展布的构造带,本次研究的隆昌地区位于构造带北部的辽吉地区。长期以来,辽吉地区古元古代地层被划归为辽河群、老岭群和集安群等,连同带内多期古元古代花岗岩类和基性岩(岩脉)类构成了辽吉古元古代造山带的主体。主要由变火山岩—沉积岩系构成的辽河群,又以盖县—析木—塔岭—莊草—叆阳为界划分为了南辽河群和北辽河群(辽宁省地质矿产局,1989),二者特征差异之一就是北辽河群内产出大量的变质基性岩(岩脉),也包括部分斜长角闪岩。北辽河群又被划分为浪子山组、里尔峪组、高家峪组、大石桥组和盖县组等 5 个组级地层单位(辽宁省地质矿产局,1989)。其中变质基性岩(含部分斜长角闪岩)主要与里尔峪组变粒岩、浅粒岩、变质火山岩,高家峪组片岩夹大理岩、炭质板岩,以及大石桥组夹云母片岩的厚层大理岩等地层产出关系密切(辽宁省地质矿产局,1989)。

隆昌地区辉长岩呈似层状、脉状,常与大石桥组方解大理岩、白云质大理岩呈构造接触关系产出(图 1)。岩石新鲜面呈黑绿色,变辉长结构、块状构造,斜长石与变辉石均呈半自形—他形,结晶程度相近;镜下薄片观察发现辉石部分已发生蚀变为阳起石、绿帘石等矿物,仅保留辉石晶型,含量约 40% 左右;斜长石呈自形长柱状,正交偏光下呈一级灰

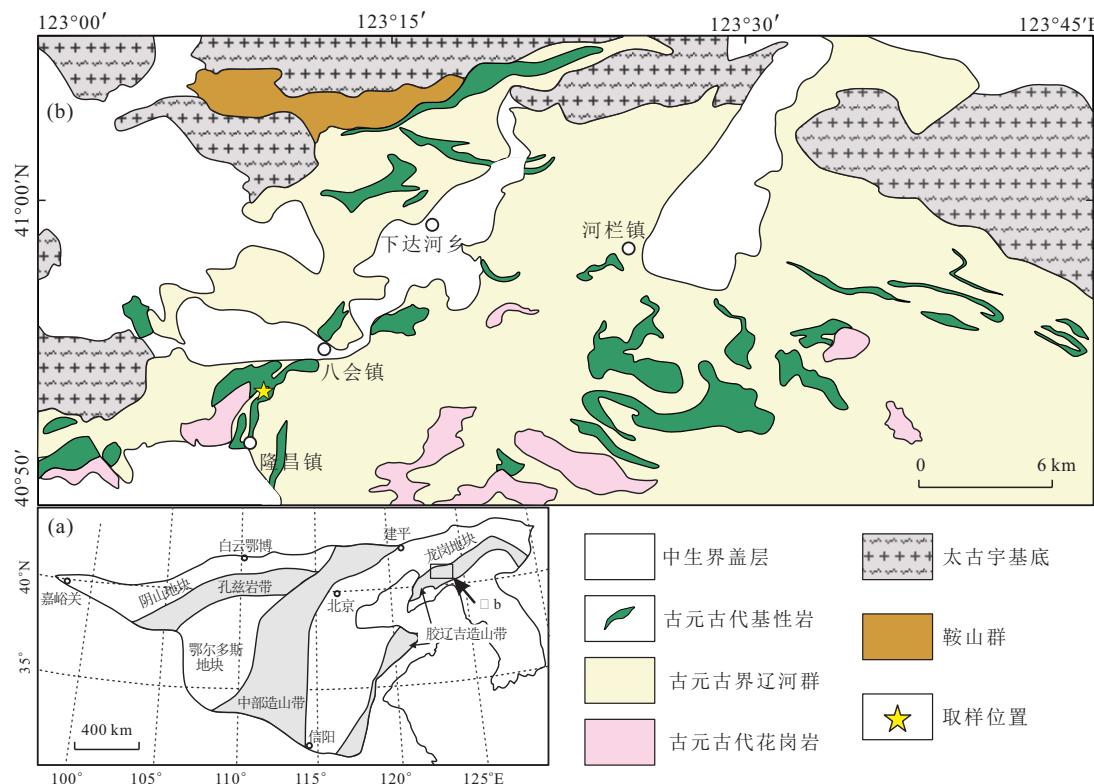


图1 胶辽吉造山带构造简图(a)和隆昌地区辉长岩地质简图(b)

Fig.1 Geotectonic framework of the Jiao-Liao-Ji orogenic belt (a) and simplified geological map of the gabbro in Longchang area, Liaodong peninsula(b)

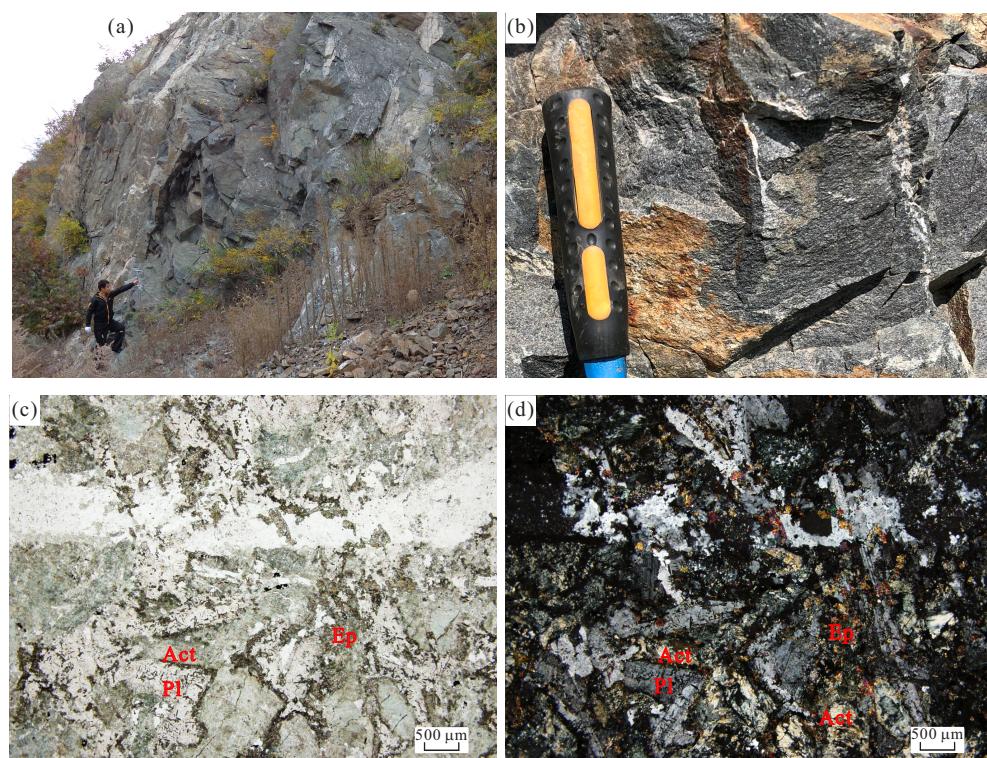


图2 隆昌地区辉长岩野外照片(a, b)和镜下显微照片(单偏光)(c) (正交偏光)(d)

Fig.2 Fieldwork pictures (a, b) and microphotographs (c, d) of the gabbro in Longchang area, Liaodong peninsula

Pl. 斜长石; Ep. 绿帘石; Act. 阳起石

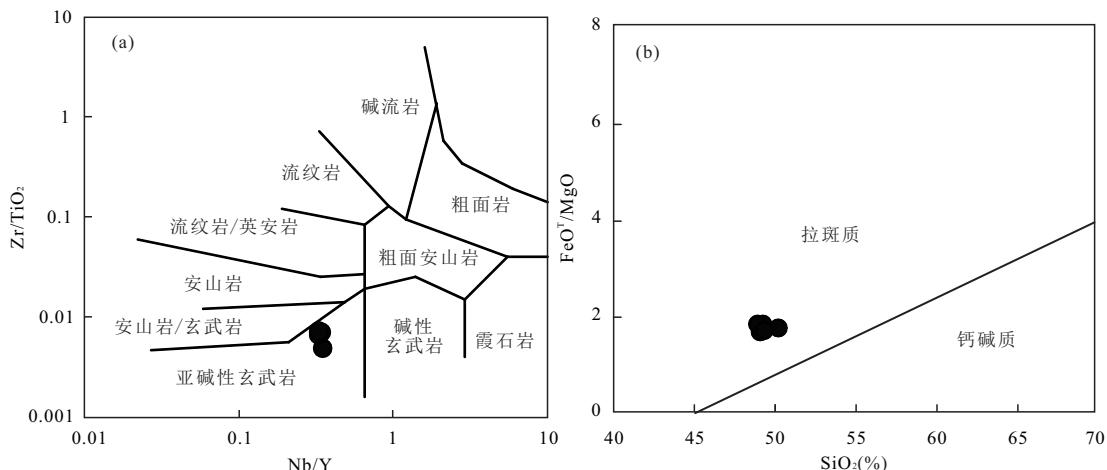


图3 隆昌地区辉长岩 Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y 图解(a)和 FeO<sup>T</sup>/MgO-SiO<sub>2</sub> 分类图解(b)

Fig.3 Zr/TiO<sub>2</sub> vs. Nb/Y (a) and FeO<sup>T</sup>/MgO vs. SiO<sub>2</sub>(b) diagrams for the gabbro samples from the Longchang area

图a据 Winchester and Floyd(1977); 图b据 Miyashiro(1974)

白色干涉色，少见双晶，亦发生绢云母化等弱蚀变，含量约60%（图2）。在岩石判别图解上，样品落入亚碱性玄武岩区域和拉斑质系列范围内（图3）。

## 2 测试方法

## 2.1 错石 LA ICP-MS U-Pb 年龄测试

辉长岩按照常规重磁分选后在双目镜下挑选出晶形完好、具代表性的锆石颗粒,用环氧树脂固定于样品靶后抛光。锆石样品阴极发光图像拍摄和 LA ICP-MS 测试均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,详细的仪器参数和分析流程见 Zong *et al.* (2017)。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成,ICP-MS 型号为 Agilent 7700e。本次分析的激光束斑和频率分别为 32  $\mu\text{m}$  和 10 Hz。对分析数据的离线处理采用软件 ICPMS DataCal 完成。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex\_ver3 (Ludwig, 2003) 完成。

## 2.2 地球化学成分测试

主、微量元素测试在国土资源部东北矿产资源监督检测中心完成。主量元素测试使用X射线荧光光谱法测定,测试仪器为飞利浦PW2404X射线荧光光谱仪,分析精度优于5%。微量及稀土元素利用酸溶法制备样品并在HR ICPMS电感耦合等离子体质谱测试。当元素含量大于 $10 \times 10^{-6}$ 时,分析精度优于5%;当含量小于 $10 \times 10^{-6}$ 时,精度优于10%。全岩样品粉碎至200目后,由核工业北京地质研究院分析测试中心完成Nd同位素测试,分析仪

器为 ISOPROBE-T 型热电离质谱仪, 分析误差以  $\pm 2\%$  计。

### 2.3 错石 Hf 同位素分析

锆石 Hf 同位素分析利用南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室的激光剥蚀多接收等离子质谱( LAMC-ICP-MS) 完成测试, 其中激光剥蚀器型号为 New Wave 公司生产的 UP193FX 型固体激光剥蚀系统, MC-ICP-MS 型号为 Thermo Fisher 公司生产的 Neptune Plus. 剥蚀直径采用 35  $\mu\text{m}$ , 激光脉冲频率为 8 Hz, 信号采集次数 200 次, 采集时间为 1 min 左右. 仪器的测试条件及详细分析流程参见侯可军等(2007).  $^{176}\text{Lu}$  的衰变常数采用  $1.865 \times 10^{-11}\text{a}^{-1}$  (Scherer *et al.*, 2001),  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值的计算采用文献(Bouvier *et al.*, 2008)推荐的球粒陨石 Hf 同位素值:  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$ ,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.82772$ . Hf 模式年龄采用现代亏损地幔的  $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}$  比值 0.28325 和  $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}$  比值 0.0384 (Griffin *et al.*, 2000)、以及平均地壳的  $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{c}}$  比值 0.015 (Amelin *et al.*, 1999) 进行计算.

3 结果

### 3.1 锆石 U-Pb 年龄结果

从 CL 图可以看出,辉长岩中锆石呈长柱状或不规则状,发育较清晰的板状环带(图 4a).Th/U 值介于 0.31~1.87,也显示典型岩浆锆石特征.个别锆石颗粒也见有继承锆石特征,本次测试主要选择典型岩浆锆石特征颗粒进行测试.锆石 U-Pb 测试结

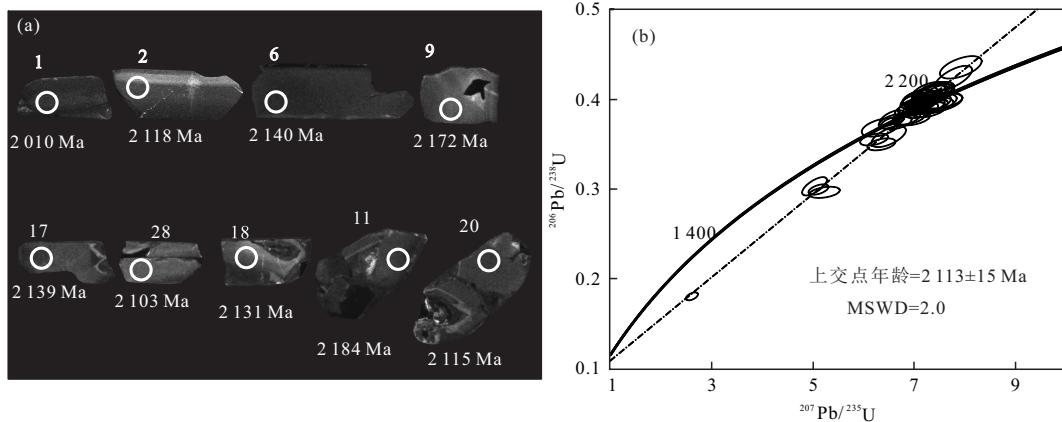


图4 隆昌地区辉长岩样品典型锆石CL图和U-Pb测年结果

Fig.4 Cathodoluminescence(CL) images for zircon grains of gabbro sample showing sites of U-Pb analyses (a) and results (b) from the Longchang area

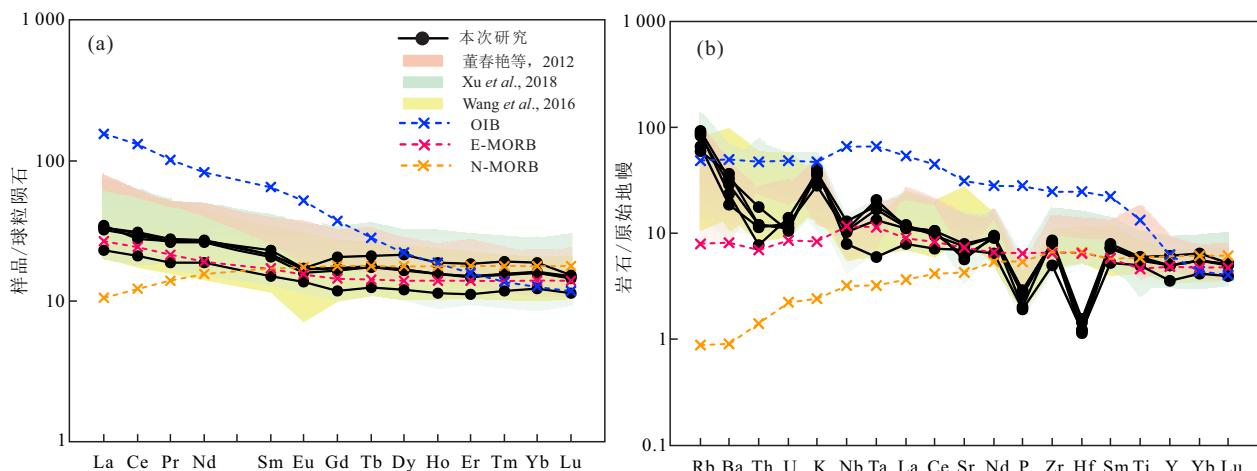


Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) for gabbro samples from the Longchang area

OIB,E-MORB,N-MORB 及标准化数据来自 Sun and McDonough(1989)

果列于表1,部分测试点存在一定铅丢失.所有分析点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 上交点年龄为 $2\ 113\pm 15\ \text{Ma}$ , MSWD为2.0(图4b),代表了辉长岩的形成年龄.

### 3.2 主量、微量元素特征

辉长岩样品的全岩主量、微量元素数据分析结果见表2.整体来看,样品受一定蚀变影响, $\text{SiO}_2$ 含量中等, $\text{TiO}_2$ 含量较低, $\text{MgO}$ 含量不高( $6.88\%\sim 7.62\%$ ), $\text{P}_2\text{O}_5$ 含量低( $0.08\%\sim 0.13\%$ ), $\text{FeO}$ 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 含量较高, $\text{K}_2\text{O}$ 含量中等稍高( $0.85\%\sim 1.23\%$ ).由于遭受一定蚀变,进行岩性判别投图时采用了元素活泼性较差的元素,并将烧失量扣除后重新换算再进行投图,在判别图上,样品落入亚碱性玄武岩和拉斑质玄武岩系列范围内(图3b).

辉长岩样品稀土元素含量不高, $\sum\text{REE}$ 含量在

$43.01\times 10^{-6}\sim 63.35\times 10^{-6}$ 之间,轻重稀土间分馏不强, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 $1.84\sim 2.08$ ,表现出较“平坦”的稀土配分模式,无Ce异常,存在弱负Eu异常.样品明显富集大离子亲石元素Rb、Ba、K等,亏损P、Hf等高场强元素;在与Sun and McDonough(1989)统计的不同构造单元内地质体微量元素与稀土元素特征对比图解中,辉长岩表现出更接近E-MORB分布形式,并显示出具有地壳成分的特征(图5).

### 3.3 锆石Hf同位素

样品锆石原位Hf同位素测试结果列于表3,Hf同位素值计算采用的年龄为辉长岩的形成年龄.辉长岩锆石( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )比值变化于 $0.281\ 497\sim 0.281\ 612$ 之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 $2.2\sim 6.3$ 之间,阶段模式年龄 $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 在 $2.25\sim 2.41\ \text{Ga}$ 之间,两阶段模

表 1 隆昌地区辉长岩锆石 U-Pb 测年数据

Table 1 In-situ zircon U-Pb isotopic dating for gabbro in the Longchang area, Liaodong peninsula

测试点	含量( $10^{-6}$ )			同位素比值						同位素年龄(Ma)					
	Th	U	Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$		
LC-1	110	351	0.31	6.338 6	0.152 6	0.369 0	0.004 2	2 025	19.6	2 024	21.2	2 010	41.5		
LC-2	161	196	0.82	6.894 9	0.128 9	0.378 9	0.002 9	2 071	13.5	2 098	16.6	2 118	31.6		
LC-3	1 046	892	1.17	5.114 2	0.081 4	0.299 9	0.002 4	1 691	11.9	1 838	13.6	2 003	27.9		
LC-4	283	346	0.82	7.486 1	0.127 6	0.406 6	0.004 0	2 199	18.6	2 171	15.3	2 139	21.1		
LC-5	327	303	1.08	7.377 5	0.125 3	0.402 4	0.003 5	2 180	16.1	2 158	15.3	2 131	28.1		
LC-6	174	273	0.64	6.986 1	0.133 6	0.378 7	0.003 1	2 070	14.7	2 110	17.0	2 140	31.3		
LC-7	367	280	1.31	6.351 3	0.114 4	0.349 9	0.002 7	1 934	12.8	2 026	15.9	2 122	31.2		
LC-8	201	241	0.83	7.347 2	0.131 0	0.393 1	0.003 1	2 137	14.5	2 155	16.0	2 162	29.9		
LC-9	128	165	0.78	7.294 1	0.140 4	0.388 4	0.003 4	2 115	15.7	2 148	17.2	2 172	33.3		
LC-10	147	172	0.86	7.563 6	0.159 9	0.397 8	0.003 7	2 159	17.2	2 181	19.0	2 192	37.0		
LC-11	303	332	0.91	7.548 7	0.168 4	0.398 5	0.003 5	2 162	16.4	2 179	20.1	2 184	40.4		
LC-12	202	264	0.77	7.475 1	0.197 9	0.396 7	0.004 6	2 154	21.2	2 170	23.8	2 176	52.6		
LC-13	585	702	0.83	5.231 3	0.122 6	0.296 3	0.002 6	1 673	12.9	1 858	20.0	2 057	42.6		
LC-14	284	339	0.84	7.327 5	0.185 1	0.393 2	0.003 9	2 138	18.1	2 152	22.6	2 150	42.4		
LC-15	299	313	0.95	7.485 4	0.148 6	0.396 6	0.003 9	2 153	17.8	2 171	17.8	2 173	33.6		
LC-16	184	232	0.79	7.383 9	0.138 3	0.396 0	0.003 6	2 151	16.8	2 159	16.8	2 154	31.6		
LC-17	134	206	0.65	7.267 1	0.137 2	0.392 7	0.003 7	2 136	17.1	2 145	16.9	2 139	32.1		
LC-18	168	215	0.78	7.144 7	0.136 9	0.387 9	0.003 7	2 113	17.1	2 130	17.1	2 131	33.5		
LC-19	190	251	0.76	7.334 0	0.141 4	0.405 0	0.004 5	2 192	20.7	2 153	17.3	2 103	33.6		
LC-20	33	65	0.51	7.918 5	0.169 0	0.435 4	0.005 2	2 330	23.2	2 222	19.3	2 115	37.3		
LC-21	371	369	1.00	7.109 9	0.112 4	0.392 2	0.003 3	2 133	15.1	2 125	14.2	2 106	27.2		
LC-22	209	244	0.86	7.139 1	0.121 9	0.394 5	0.003 7	2 144	16.9	2 129	15.3	2 102	28.9		
LC-23	223	265	0.84	7.776 3	0.149 7	0.424 3	0.005 5	2 280	24.7	2 205	17.4	2 128	28.7		
LC-24	197	250	0.79	7.003 6	0.129 6	0.391 0	0.003 5	2 127	16.4	2 112	16.5	2 088	32.7		
LC-25	137	238	0.58	6.643 7	0.125 3	0.374 5	0.003 1	2 051	14.5	2 065	16.7	2 069	32.7		
LC-26	359	382	0.94	7.181 6	0.123 2	0.396 5	0.003 6	2 153	16.8	2 134	15.4	2 105	27.8		
LC-27	106	146	0.72	7.371 8	0.135 9	0.408 9	0.004 0	2 210	18.5	2 158	16.5	2 098	25.0		
LC-28	548	444	1.24	7.045 8	0.113 0	0.389 2	0.002 9	2 119	13.5	2 117	14.3	2 103	27.6		
LC-29	293	337	0.87	7.198 9	0.134 1	0.397 4	0.004 5	2 157	20.6	2 136	16.7	2 106	29.3		
LC-30	1 368	753	1.82	6.495 6	0.138 3	0.358 2	0.004 7	1 974	22.3	2 045	18.8	2 106	32.4		
LC-31	270	329	0.82	7.432 8	0.145 4	0.409 9	0.004 0	2 214	18.4	2 165	17.6	2 109	32.3		
LC-32	159	179	0.89	7.417 7	0.135 3	0.408 0	0.003 9	2 206	18.1	2 163	16.4	2 117	31.3		
LC-33	326	357	0.91	6.551 3	0.102 7	0.375 8	0.003 3	2 056	15.6	2 053	13.9	2 043	26.8		
LC-34	268	278	0.96	7.245 2	0.123 3	0.400 1	0.003 9	2 170	17.9	2 142	15.3	2 109	27.5		
LC-35	185	208	0.89	7.197 5	0.122 9	0.397 6	0.003 6	2 158	16.5	2 136	15.3	2 109	27.8		
LC-36	262	288	0.91	7.283 1	0.134 3	0.409 3	0.004 3	2 212	19.6	2 147	16.5	2 079	29.5		
LC-37	267	290	0.92	7.071 4	0.130 6	0.401 0	0.003 9	2 174	18.0	2 120	16.5	2 062	30.6		
LC-38	43	101	0.42	7.298 3	0.138 4	0.406 5	0.004 0	2 199	18.2	2 149	17.0	2 094	31.2		
LC-39	983	530	1.86	5.033 4	0.099 6	0.303 4	0.004 1	1 708	20.5	1 825	16.8	1 950	25.9		
LC-40	377	395	0.95	6.987 5	0.107 6	0.397 8	0.003 3	2 159	15.4	2 110	13.8	2 054	25.9		

式年龄  $t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$  值在 2.32~2.57 Ga 之间。

#### 3.4 Nd 同位素特征

辉长岩样品 Nd 同位素特征值等列于表 4, 计算

的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值介于 -1.6~2.6, 虽显示地幔特征也具有地壳成分特征。根据锆石年龄和 Nd 同位素获得的两阶段模式年龄  $t_{\text{DM2}}$  介于 2.3~2.6 Ga, 与  $t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$

表2 隆昌地区辉长岩主微量元素数据(主量元素的单位为%,微量元素的单位为 $10^{-6}$ )

Table 2 Whole rock chemical compositions of gabbro samples in the Longchang area, Liaodong peninsula

样号	LC-1	LC-2	LC-3	LC-4	LC-5	样号	LC-1	LC-2	LC-3	LC-4	LC-5
SiO <sub>2</sub>	46.67	45.83	48.42	46.72	47.65	Nb	5.72	7.54	7.44	7.86	9.29
TiO <sub>2</sub>	1.09	1.30	1.24	1.22	1.31	Rb	59.4	53.4	42.5	38.4	55.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.75	14.00	13.80	13.31	14.71	Sr	150	121	132	168	159
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.29	3.28	3.85	4.18	4.03	Zr	55.6	91.4	91.0	89.7	97.1
FeO	8.63	10.29	9.21	9.57	7.87	La	5.45	7.89	7.62	7.93	8.20
MnO	0.17	0.20	0.19	0.21	0.15	Ce	12.8	18.9	18.0	18.8	16.9
MgO	7.62	7.32	7.36	7.37	6.88	Pr	1.77	2.62	2.48	2.55	2.55
CaO	8.79	7.50	8.68	9.35	8.83	Nd	8.73	12.80	12.20	12.50	12.50
Na <sub>2</sub> O	2.62	1.77	2.98	2.35	3.52	Sm	2.32	3.28	3.16	3.26	3.52
K <sub>2</sub> O	1.23	1.10	0.85	1.08	1.13	Eu	0.80	0.97	0.93	0.99	0.99
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.083	0.130	0.130	0.120	0.088	Gd	2.45	3.50	3.40	3.51	4.26
LOI	5.00	7.05	3.65	4.66	3.54	Tb	0.47	0.66	0.66	0.65	0.78
SUM	99.94	99.76	100.36	100.12	99.70	Dy	3.08	4.29	4.19	4.25	5.42
Hf	0.37	0.38	0.45	0.36	0.49	Ho	0.65	0.88	0.88	0.89	1.07
Ta	0.25	0.70	0.55	0.86	0.75	Er	1.85	2.49	2.44	2.49	3.04
Li	16.4	29.2	15.4	16.7	13.5	Tm	0.30	0.39	0.40	0.40	0.49
Be	0.50	0.48	0.63	0.55	1.44	Yb	2.07	2.71	2.72	2.74	3.20
Sc	41.6	42.3	42.3	43.3	59.7	Lu	0.29	0.37	0.38	0.38	0.39
Ni	51.6	47.5	50.4	53.7	31.3	Y	16.5	22.9	22.7	22.9	28.3
Cs	0.83	0.75	0.53	0.37	0.79	$\Sigma$ REE	43.01	61.76	59.45	61.35	63.35
Th	1.50	1.03	0.98	1.02	0.67	LREE	31.85	46.45	44.39	46.04	44.70
U	0.22	0.24	0.26	0.23	0.29	HREE	11.16	15.3	15.06	15.31	18.66
Ba	231	204	130	255	165	(La/Yb) <sub>N</sub>	1.88	2.08	2.01	2.08	1.84
Pb	3.14	3.27	3.33	4.15	6.32	$\delta$ Eu	1.02	0.87	0.86	0.89	0.78

表3 隆昌地区辉长岩锆石原位Hf同位素组成

Table 3 In-situ zircon Hf isotopic data for gabbro in the Longchang area, Liaodong peninsula

点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}$	$t_{\text{DM2}}$
LCZ-1	0.098 214	0.002 597	0.281 660	0.000 020	0.281 556	4.2	2 327	2 440
LCZ-2	0.083 844	0.002 226	0.281 651	0.000 018	0.281 562	4.5	2 317	2 427
LCZ-3	0.155 910	0.003 544	0.281 728	0.000 019	0.281 585	5.3	2 290	2 376
LCZ-4	0.122 781	0.003 332	0.281 686	0.000 018	0.281 552	4.1	2 337	2 449
LCZ-5	0.141 439	0.003 430	0.281 703	0.000 022	0.281 565	4.6	2 318	2 419
LCZ-6	0.104 470	0.003 238	0.281 741	0.000 037	0.281 610	6.2	2 251	2 321
LCZ-7	0.079 143	0.002 104	0.281 671	0.000 020	0.281 586	5.3	2 281	2 374
LCZ-8	0.085 358	0.002 076	0.281 684	0.000 015	0.281 601	5.8	2 261	2 342
LCZ-9	0.102 462	0.002 562	0.281 673	0.000 020	0.281 570	4.7	2 307	2 410
LCZ-10	0.077 420	0.001 973	0.281 683	0.000 016	0.281 603	5.9	2 256	2 336
LCZ-11	0.140 272	0.003 607	0.281 757	0.000 019	0.281 612	6.3	2 250	2 316
LCZ-12	0.100 750	0.002 549	0.281 700	0.000 019	0.281 597	5.7	2 267	2 349
LCZ-13	0.105 547	0.003 020	0.281 619	0.000 017	0.281 497	2.2	2 414	2 568
LCZ-14	0.182 231	0.005 223	0.281 803	0.000 020	0.281 593	5.6	2 287	2 360
LCZ-15	0.154 204	0.003 991	0.281 728	0.000 016	0.281 567	4.7	2 319	2 416

注:所有点号的年龄都取2 113 Ma计算Hf同位素值.

表 4 隆昌地区辉长岩 Nd 同位素组成

Table 4 Whole rock Nd isotopic compositions for gabbro in the Longchang area, Liaodong peninsula

点号	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}$	$T_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$T_{\text{DM2}}(\text{Ma})$
LC-1	2.32	8.73	0.160 56	0.509 909	0.000 009	0.2	2 873	2 536
LC-2	3.28	12.8	0.154 39	0.510 032	0.000 011	2.6	2 482	2 342
LC-3	3.16	12.2	0.156 62	0.509 981	0.000 010	1.6	2 631	2 423
LC-4	3.26	12.5	0.157 28	0.509 863	0.000 015	-0.7	2 949	2 607
LC-5	3.52	12.5	0.170 08	0.509 819	0.000 006	-1.6	3 346	2 677

年龄基本一致.

## 4 讨论

### 4.1 成岩年龄

前人在变质基性岩集中产出的辽阳—海城—本溪一带开展了大量的锆石 U-Pb 测年工作, 测试对象包括变质基性岩、变质玄武岩(斜长角闪岩)等地质体. 获得的变质基性岩年龄结果集中为两个区间, 分别为~2 158 Ma 至~2 060 Ma 和~1 919 Ma 至~1 870 Ma(于介江等, 2007; 董春艳等, 2012; Li and Chen, 2014 秦亚等, 2015; Wang *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018). 多数斜长角闪岩(或称变玄武岩)的年龄较为集中, 在~1 919 Ma 至~1 870 Ma 之间, 研究者基本认同其代表了胶辽吉造山带造山引发的广泛变质作用发生的时间, 而集中在变质辉长岩等基性岩的成岩年龄、产出构造背景等争议则较多.

本次研究测试挑选的锆石具有典型的基性岩锆石特征, CL 图可以看出多具板状环带, 测试点中很少选取有继承锆石特征的颗粒. 锆石 Th/U 值较高, 在 0.31~1.87 之间, 也显示出岩浆锆石特征. 锆石 U-Pb 测试中有铅丢失现象, 不一致曲线的 2 113±15 Ma 上交点年龄应可以代表锆石寄主岩石的结晶年龄.

前人曾认为辉长岩等基性岩中  $\text{SiO}_2$  含量低, 锆石( $\text{ZrSiO}_4$ )等硅酸盐矿物在硅不饱和情况下晶出较少, 针对其开展的 U-Pb 定年结果不甚可靠, 而将研究对象转向基性岩中的斜锆石( $\text{ZrO}_2$ ). 董春艳等(2012)和 Wang *et al.*(2016)曾分别在附近的鞍山和海城地区针对辉长岩、辉绿岩等基性岩(脉)内斜锆石开展过 SHRIMP 和 SIMS 测试, 并分别获得了 2 110±31 Ma 和 2 115±3 Ma 的测年结果, 与本次研究辉长岩中锆石给出的测年结果完全一致. 国内其他学者也有在基性—超基性岩中获得可靠成岩年龄的先例(刘飞等, 2018; 曹亮等, 2019; 郑建平

等, 2019). 综合分析认为, 本次研究在隆昌地区采集的辉长岩成岩年龄在 2 113 Ma 左右.

### 4.2 岩石成因

本次采集的辉长岩虽经弱蚀变, 仍保留了明显的辉长结构, 岩石地球化学特征也显示蚀变尚弱. 样品稀土元素含量整体不高, 其配分模式呈“平坦型”, 轻重稀土分馏不明显, 仅有弱  $\delta\text{Eu}$  异常; 微量元素蛛网图上显示富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素, 稀土与微量元素图解均表现出变质辉长岩与 E-MORB 元素配分模式分布接近的特征(图 5). 此外, 在 Ti-Sm-V 构造判别图解上, 本次研究样品也落入 MORB 范围, 既未显示陆内玄武岩也无岛弧玄武岩特征(图 6a); 样品在微量元素蛛网图上无 Nb、Ta 等元素明显的亏损, 也未表现出岛弧玄武岩的特征(Rollison, 1993). 在 Th/Yb-Nb/Yb 图解(图 6b)中, 样品也落入 E-MORB 及之上的壳幔混合范围之内. 综合以上信息, 认为隆昌地区变辉长岩具有与 MORB 类似的特征.

在微量元素蛛网图上, 大离子亲石元素强烈富集而 P、Hf 等高场强元素明显亏损(图 5b), 表现出混入了地壳成分的特征. 同样, 测试辉长岩样品的 Nb/Ta 值在 9.20~23.34 之间, 平均值为 13.80, 低于大陆地壳(Nb/Ta=17.1), 暗示源区岩石可能混入了大陆地壳成分. Nd 同位素研究结果表明  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值介于 -1.6~2.6, 计算的两阶段模式年龄  $t_{\text{DM2}}$  介于 2.3~2.6 Ga. 在  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  vs  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  图解上可以看出较高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值对应的标准化后 La/Sm 值较高, 反之则较低, 结合前人在区域范围内研究成果, 整体的趋势更明显, 反映出岩石由地幔成分混合了陆源碎屑的特征(图 7a). 同样地, Nd 同位素计算值和阶段模式年龄图中也反映出地壳混染的趋势(图 7b).

辉长岩 Hf 同位素研究显示  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值均为正值, 介于 2.2~6.3, 计算的模式年龄  $t_{\text{DM1}}(\text{Hf})$  值在 2.25~2.33 Ga 之间. 吴福元等(2007)研究认为针对幔源岩浆, 如果锆石母岩浆直接来源于地幔, 锆石 U-Pb 年

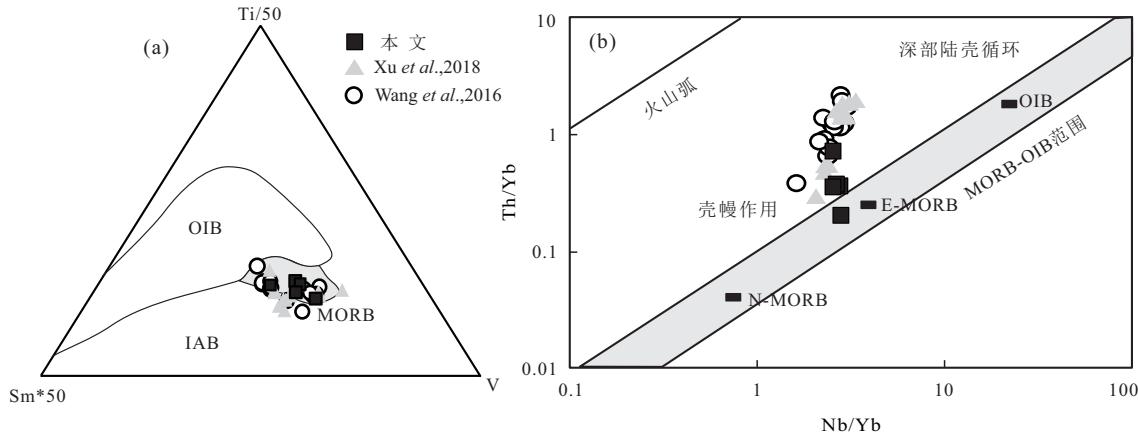
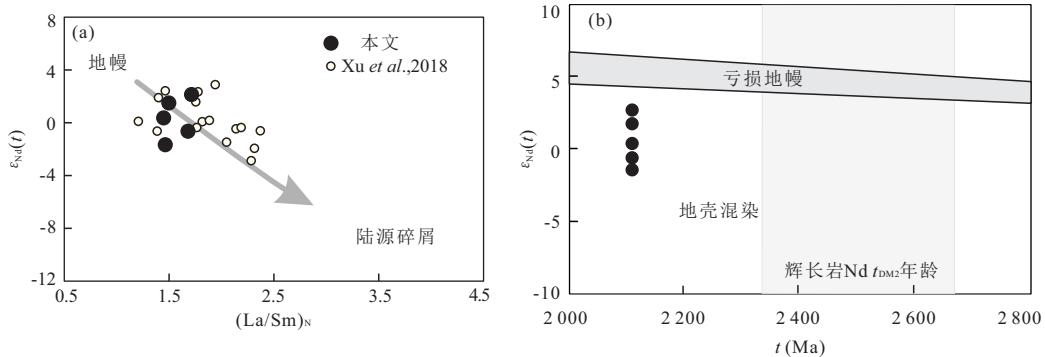


图6 隆昌地区辉长岩Ti-Sm-V三角图解(a)和Th/Yb-Nb/Yb判别图解(b)

Fig.6 Ti-Sm-V (a) and Th/Yb-Nb/Yb (b) discrimination plots for the gabbro samples from the Longchang area

图7 隆昌地区辉长岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(\text{La}/\text{Sm})_N$  (a) 和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $t$  (b) 图解Fig.7 Plots of  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  vs.  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  (a) and  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  vs.  $t$  (b) for the gabbro samples from the Longchang area

龄应与锆石Hf模式年龄近似。本次研究的辉长岩的锆石年龄在2 113 Ma左右,与模式年龄 $t_{\text{DM1}}(\text{Hf})$ 值相差较大,也反映岩石源区并非直接来源于地幔。在Hf同位素特征图上也可以看到,样品测试点均落在了亏损地幔与球粒陨石演化线之间(图8a),同时引入前人(Griffin *et al.*, 2002)研究的地壳Lu/Hf数据范围,辉长岩锆石Hf同位素数据在地壳 $t_{\text{DM}}=2.3 \text{ Ga}$ 和 $t_{\text{DM}}=2.8 \text{ Ga}$ 之间,不排除有地壳来源的可能性。在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (图8b)图解中,辉长岩数据落入下地壳和洋岛玄武岩重合范围之内。另外,Xu *et al.*(2018)也曾对河栏镇一带变质基性岩进行统计与分析,认为是经历了较高程度演化的岩浆,混入地壳成分的结果。本次研究采集岩石样品可能起源于地幔,在基性岩浆侵位上升过程中混入了地壳(陆壳)成分。

### 4.3 构造意义

产出在胶辽吉造山带内基性岩的地球化学及同位素特征研究对了解造山带早期演化具有重要意义。上文已述及,胶辽吉造山带早期演化构造背

景争议的焦点集中在陆内裂谷和弧陆碰撞两种模式(张秋生, 1988; 白瑾等, 1993; 李三忠等, 2001; 路孝平等, 2004; Li *et al.*, 2006; 王惠初等, 2011; Li and Chen, 2014)。产于“北辽河群”中的基性岩曾被认为与里尔峪组酸性火山岩构成“双峰式火山岩”,是裂谷构造环境的有利支撑证据之一(张秋生, 1988; Li *et al.*, 2006; 陈井胜等, 2017)。陈井胜等(2017)曾在辽阳地区报道了酸性火山岩存在3个活动期次,~2 190 Ma至~2 180 Ma的锆石年龄数据谐和较好,其余锆石年龄数据较分散;以上结果与李壮等(2015)在辽阳地区获得 $2 201 \pm 5 \text{ Ma}$ 的变质流纹岩结果类似。而本次研究与前人在辽阳、鞍山一带获得的辽河群变质基性岩的年龄均集中在~2 115 Ma至~2 110 Ma,与前人报道的酸性火山岩在形成时代上相差较大。此外,Li *et al.*(2019)通过对北辽河群内产出的火山岩地球化学统计分析发现,这些火山岩构成连续的亚碱性岩浆序列。地球化学与锆石年龄研究结果不支持“双峰式火山岩”的存在,而更像是产出在造山带内的岩石组合

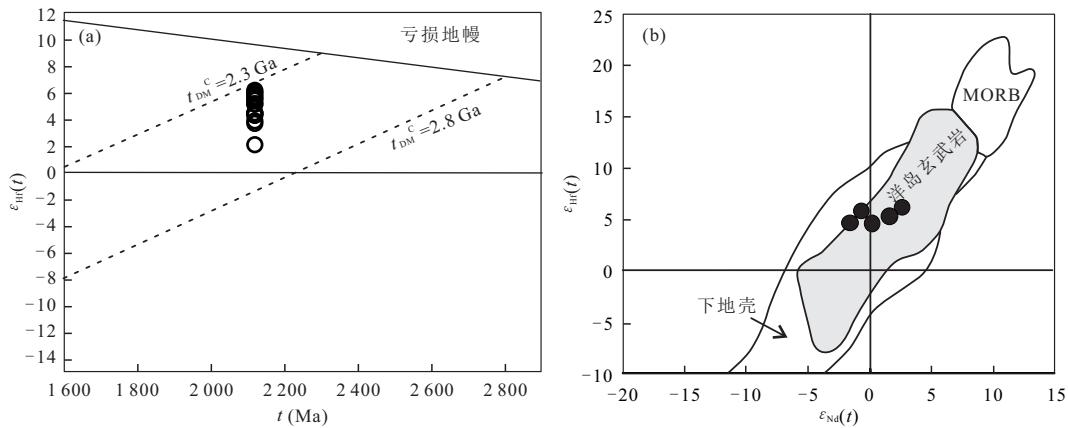
图 8 隆昌地区辉长岩锆石 Hf 同位素组成(a)与  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (b)图解

Fig.8 Hf isotopic compositions of zircons(a) and  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  vs.  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  diagram(b) for the gabbro samples from the Longchang area  
图 a 据 Griffin et al.(2002); 图 b 据 Vervoort et al.(1999)

特征。

本次采集的样品岩石地球化学特征与 Wang et al. (2016) 和 Xu et al. (2018) 分别在距本次采样点约 20 km 东侧的河栏镇及以南地区采集的变辉长岩、变辉绿岩微量元素特征存在差异, 前人研究结果中 Nb、Ta、Ti 等元素存在明显亏损, 具有岛弧玄武岩特征。上述差异可能有几点原因, 首先岩石样品成分略有差异, 从前人描述的野外产状与镜下特征可看出, 其样品涵盖了辉长岩、辉绿岩以及部分斜长角闪岩, 不同的岩石样品产自不同的构造环境; 此外, 采样位置不同, Wang et al. (2016) 和 Xu et al. (2018) 采集样品集中在河栏镇及以南地区, 区域地质图上(图 1b)可看出河栏镇以南基性岩呈岩席状产出, 与辽河群地层产状基本一致; 而隆昌地区辉长岩呈 NE 向岩脉状产出。可能的一种解释是前人研究的河栏镇地区基性岩具有岛弧玄武岩特征, 产出于岛弧(陆缘弧)构造背景下。而 Wang et al. (2016) 通过变基性岩 Nb、Th、La 等特征元素比值分析, 认为基性岩源区来自地幔中残留的太古代俯冲陆壳。本次研究对辉长岩进行锆石原位 Hf 同位素测试, 结果显示其阶段模式年龄  $t_{\text{DM}}$ (Hf) 值介于 ~2.25 Ga 至 ~2.41 Ga, 可认为辉长岩原岩形成时代不早于此年龄, 以辉长岩为代表的基性岩可能不是来自太古代陆壳物质的重熔, 而应来自古元古代俯冲带。

隆昌地区变辉长岩可能产于弧后盆地拉伸环境之下, 俯冲洋壳携带了大量陆源碎屑物和水, 在洋壳下插过程中, 这些活泼成分逐渐富集在俯冲带

上方的地幔楔部位, 富水矿物的脱水使得地幔楔岩石发生熔融, 逐渐形成基性岩浆, 在拉张环境下岩浆上侵, 侵位过程中不断有上覆地壳成分加入, 最终在地表附近形成辉长岩等基性岩。鉴于东南侧河栏镇附近报道了具有岛弧玄武岩性质的变质基性岩, 可能代表了古岛弧的位置, 北西侧隆昌地区辉长岩可能产于弧后部位, 俯冲可能发生在由现今南东向北西方向。胶辽吉造山带在古元古代早期即存在洋壳俯冲, 并可能已存在古岛弧, 造山带演化接近弧陆碰撞演化模式。

## 5 结论

(1) 辉长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果显示隆昌地区辉长岩形成时代为  $2113 \pm 15$  Ma (MSWD=2.0), 与区域范围内前人在变质基性岩中采集斜锆石年代学结果一致。

(2) 辉长岩呈轻重稀土分馏不明显的“平坦型”配分模式, 仅有弱  $\delta\text{Eu}$  异常, 富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素, 亏损 P、Hf 等高场强元素, 与混入地壳成分的 E-MORB 特征接近。辉长岩相对富集 Nd 同位素,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值介于 -1.6~2.6; 在 Hf 同位素特征图上辉长岩样品测试点均落在了地壳  $t_{\text{DM}}=2.3$  Ga 和  $t_{\text{DM}}=2.8$  Ga 之间, 在  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  图解中, 数据落入下地壳范围之内, 具有部分地壳来源特征。

(3) 辉长岩源区岩石来自古元古代俯冲带。隆昌地区变质辉长岩产于弧后盆地拉张环境之下, 胶辽吉造山带在古元古代早期演化更接近弧陆碰撞模式。

**致谢:**感谢多家实验室在论文样品测试过程中提供的帮助,成文过程中与沈阳地质调查中心基础地质研究室马永非博士进行了有益探讨,两位审稿人提出的建设性修改意见使文章水平得到了很大提升,在此一并表示诚挚的谢意。

## References

- Amelin, Y., Lee, D. C., Halliday, A. N., et al., 1999. Nature of the Earth's Earliest Crust from Hafnium Isotopes in Single Detrital Zircons. *Nature*, 399(6733): 252–255. <https://doi.org/10.1038/20426>
- Bai, J., 1993. The Precambrian Geology and Pb-Zn Mineralization in the Northern Margin of North China Platform. Geological Publishing House, Beijing, 47–89 (in Chinese).
- Bouvier, A., Vervoort, J. D., Patchett, P. J., 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd Isotopic Composition of CHUR: Constraints from Unequilibrated Chondrites and Implications for the Bulk Composition of Terrestrial Planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1–2): 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>
- Cao, L., Chen, L., Duan, Q.F., et al., 2019. Geochronology and Petrogenesis of the Donghe Pt-Pd-Bearing Ultramafic Dykes in the Northern Margin of the Yangtze Block: Constraints from Zircon Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Earth Science*, 44(2): 366–386 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. S., Xing, D. H., Liu, M., et al., 2017. Zircon U-Pb Chronology and Geological Significance of Felsic Volcanic Rocks in the Liaohe Group from the Liaoyang Area, Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9): 2792–2810 (in Chinese with English abstract).
- Chen, S., Li, X.P., Duan, W.Y., et al., 2018. Petrological and Geochronological Study of Amphibolite from Jiaobei Terrane. *Earth Science*, 43(3): 716–732 (in Chinese with English abstract).
- Chen, S., Li, X.P., Kong, F.M., et al., 2018. Metamorphic Evolution and Zircon U-Pb Ages of the Nanshankou Mafic High Pressure Granulites from the Jiaobei Terrane, North China Craton. *Journal of Earth Science*, 29(5): 1219–1235. <https://doi.org/10.1007/s12583-017-0956-9>
- Cheng, S.B., Liu, Z.J., Wang, Q.F., et al., 2017. SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope Analyses of the Mu-niushan Monzogranite, Guocheng, Jiaobei Terrane, China: Implications for the Tectonic Evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 301: 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.09.002>
- Dong, C.Y., Ma, M.Z., Liu, S.J., et al., 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): 2785–2792 (in Chinese with English abstract).
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00343-9)
- Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3–4): 237–269. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(02)00082-8)
- Hou, K.J., Li, Y.H., Zou, T.R., et al., 2007. Laser Ablation-MC-ICP-MS Technique for Hf Isotope Microanalysis of Zircon and Its Geological Applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595–2604 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Z., Han, Z.Z., Liu, Y.J., et al., 2001. Continental Dynamics and Regional Metamorphism of the Liaohe Group. *Geological Review*, 47(1): 9–18 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Chen, B., Liu, J.W., et al., 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).
- Li, S. Z., Zhao, G. C., Sun, M., et al., 2006. Are the South and North Liaohe Groups of North China Craton Different Exotic Terranes? Nd Isotope Constraints. *Gondwana Research*, 9(1–2): 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2005.06.011>
- Li, Z., Chen, B., 2014. Geochronology and Geochemistry of the Paleoproterozoic Meta-Basalts from the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Implications for Petrogenesis and Tectonic Setting. *Precambrian Research*, 255: 653–667. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.07.003>
- Li, Z., Chen, B., Yan, X. L., 2019. The Liaohe Group: An Insight into the Paleoproterozoic Tectonic Evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 326: 174–195. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.01.009>

- Li, Z. Y., Li, Y.L., Wijbrans, J.R., et al., 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. <https://doi.org/10.1007/s12583-018-0845-x>
- Liu, F., Lian, D.Y., Niu, X.L., et al., 2018. Dongbo MORB-Type Isotropic Gabbro Emplaced as an Oceanic Core Complex in Western Yarlung Zangbo Suture Zone, Tibet. *Earth Science*, 43(4):952–974(in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L., Liu, C. H., Itano, K., et al., 2017. Geochemistry, U-Pb Dating, and Lu-Hf Isotopes of Zircon and Monazite of Porphyritic Granites within the Jiao-Liao-Ji Orogenic Belt: Implications for Petrogenesis and Tectonic Setting. *Precambrian Research*, 300: 78–106. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.08.007>
- Lu, X.P., Wu, F.Y., Lin, J.Q., et al., 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): 123–138(in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 39.
- Meng, E., Liu, F. L., Liu, P. H., et al., 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. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.03.017>
- Miyashiro, A., 1974. Volcanic Rock Series in Island Arcs and Active Continental Margins. *American Journal of Science*, 274(4): 321–355. <https://doi.org/10.2475/ajs.274.4.321>
- Qin, Y., Liang, Y.H., Zhang, Q.W., et al., 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).
- Rollison, H. R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Group UK Ltd. Longman, London.
- Scherer, E., Munker, C., Mezger, K., 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium Clock. *Science*, 293(5530): 683–687. <https://doi.org/10.1126/science.1061372>
- 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>
- Vervoort, J. D., Patchett, P. J., Blachert-Toft, J., et al., 1999. Relationships between Lu-Hf and Sm – Nd Isotopic Systems in the Global Sedimentary System. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(1–2): 79–99. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(99\)00047-3](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(99)00047-3)
- Wang, H.C., Lu, S.N., Chu, H., et al., 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, X. P., Peng, P., Wang, C., et al., 2016. Petrogenesis of the 2 115 Ma Haicheng Mafic Sills from the Eastern North China Craton: Implications for an Intra-Continental Rifting. *Gondwana Research*, 39: 347–364. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.01.009>
- Wang, X. P., Peng, P., Wang, C., et al., 2017. Nature of Three Episodes of Paleoproterozoic Magmatism (2 180 Ma, 2 115 Ma and 1 890 Ma) in the Liaoji Belt, North China with Implications for Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 298: 252–267. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.06.003>
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geology*, 20: 325–343. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)
- Wu, F.Y., Li, X.H., Zheng, Y.F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220(in Chinese with English abstract).
- Xu, W., Liu, F. L., Tian, Z. H., et al., 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. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.01.011>
- Yang, C.H., Du, L.L., Song, H.X., et al., 2018. Stratigraphic Division and Correlation of the Paleoproterozoic Strata in the North China Craton: A Review. *Acta Petrologica Sinica*, 34(4): 1019–1057, 1229–1232(in Chinese with English abstract).
- Yu, J. J., Yang, D. B., Feng, H., et al., 2007. Chronology of

- Amphibolite Protolith in Haicheng of Southern Liaoning: Evidence from LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating. *Glob-al Geology*, 26(4): 391—396, 408(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q.S., 1988. Early Crust and Mineral Deposits of Liaodong Peninsula. Geological Publishing House, Beijing, 218—450 (in Chinese).
- Zheng, J.P., Zhao, Y., Xiong, Q., 2019. Genesis and Geological Significance of Zircons in Orogenic Peridotite. *Earth Science*, 44(4): 1067—1082(in Chinese with English abstract).
- Zong, K. Q., Klemd, R., Yuan, Y., et al., 2017. The Assembly of Rodinia: The Correlation of Early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) High-Grade Metamorphism and Continental Arc Formation in the Southern Beishan Orogen, Southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). *Precambrian Research*, 290: 32—48. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Zou, Y., Zhai, M. G., Santosh, M., et al., 2018. Contrasting P-T-t Paths from a Paleoproterozoic Metamorphic Orogen: Petrology, Phase Equilibria, Zircon and Monazite Geochronology of Metapelites from the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 311: 74—97. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- 董春艳,马铭株,刘守偈,等,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.
- 侯可军,李延河,邹天人,等,2007.LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. *岩石学报*, 23(10): 2595—2604.
- 李三忠,韩宗珠,刘永江,等,2001.辽河群区域变质特征及其大陆动力学意义. *地质论评*, 47(1):9—18.
- 李壮,陈斌,刘经纬,等,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.
- 辽宁省地质矿产局,1989.辽宁省区域地质志.北京:地质出版社.
- 刘飞,连东洋,牛晓露,等,2018.雅鲁藏布江缝合带西段东波 MORB型均质辉长岩的大洋核杂岩成因. *地球科学*, 43(4):952—974.
- 路孝平,吴福元,林景仟,等,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.
- 秦亚,梁一鸿,张青伟,等,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.
- 王惠初,陆松年,初航,等,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.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等,2007.Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2):185—220.
- 杨崇辉,杜利林,宋会侠,等,2018.华北克拉通古元古代地层划分与对比. *岩石学报*, 34(4):1019—1057, 1229—1232.
- 于介江,杨德彬,冯虹,等,2007.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. *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,218—450.
- 郑建平,赵伊,熊庆,2019.造山带橄榄岩中锆石的成因及其地质意义. *地球科学*, 44(4):1067—1082.

## 附中文参考文献

- 白瑾,1993.华北陆台北缘前寒武纪地质及铅锌成矿作用.北京:地质出版社,47—89.
- 曹亮,陈林,段其发,等,2019.扬子陆块北缘东河铂钯矿化超基性岩脉成岩时代与岩石成因:锆石年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束. *地球科学*, 44(2):366—386.
- 陈井胜,邢德和,刘森,等,2017.辽宁辽阳地区辽河群酸性火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. *岩石学报*, 33(9): 2792—2810.
- 陈爽,李旭平,段文勇,等,2018.胶北地块斜长角闪岩的岩石学与年代学研究. *地球科学*, 43(3):716—732.