

文章编号: 1004—5589 (2025) 01—0001—21

臧兴运, 吕鹏, 王聚胜, 等. 胶—辽—吉造山带东部古元古代构造活动新记录: 来自吉林省大兴铁矿区变辉长岩—碳酸岩杂岩的启示 [J]. 世界地质, 2025, 44 (1): 1–21. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.01.001.

ZANG X Y, LÜ P, WANG J S, et al. New record of Paleoproterozoic tectonic activity in eastern Jiao-Liao-Ji Orogenic Belt: implications from metamorphic gabbro-carbonatite complex in Daxing iron mining area, Jilin Province [J]. World Geology, 2025, 44 (1): 1–21. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.01.001.

胶—辽—吉造山带东部古元古代构造活动新记录: 来自吉林省大兴铁矿区变辉长岩—碳酸岩杂岩的启示

臧兴运^{1,2}, 吕鹏¹, 王聚胜^{1,2}, 李斌^{1,2}, 闫冬^{1,2},
孙伟国¹, 李翱鹏¹, 王永胜^{1,2*}

1. 吉林省地质调查院, 长春 130102;

2. 中国地质调查局 东北地质科技创新中心, 沈阳 110034

摘要: 为制约胶—辽—吉造山带东部的构造演化, 笔者利用岩石学、岩石化学、岩石地球化学、锆石 U-Pb 定年对大兴铁矿区变辉长岩—碳酸岩杂岩的岩石成因、成岩构造背景展开研究。结果显示, 大兴铁矿区变辉长岩—碳酸岩杂岩岩石类型有变辉长岩、碳酸岩、磁铁矿体, 以变辉长岩为主。岩石化学研究表明, 变辉长岩 $w(\text{SiO}_2)$ 在 44.23% ~ 48.80% 之间, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 在 0.94% ~ 2.86% 之间, $w(\text{K}_2\text{O})$ 在 0.51% ~ 1.90% 之间, $w(\text{TiO}_2)$ 在 0.42% ~ 0.93% 之间, $w(\text{CaO})$ 在 8.73% ~ 14.78% 之间, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 在 1.12 ~ 2.27 之间, $\text{MgO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ 的比值介于 0.54 ~ 0.60 之间, $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ni}^{2+})/(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}^{2+})$ 为 1.44 ~ 2.02, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ 为 0.60 ~ 0.68, 分异指数 (DI) 介于 11.76 ~ 31.79, 岩石呈现偏碱性的富铁、钠, 低钾、钛的基性—超基性岩浆特征, 分异作用较弱。岩石地球化学研究表明, 富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素 [$w(\text{Rb})$ (4.80×10^{-6} ~ 74.82×10^{-6}), $w(\text{Ba})$ (83.09×10^{-6} ~ 430.10×10^{-6})], 高场强元素 Hf、Th、Ta 等相对较为富集 [$w(\text{Hf})$ (1.41×10^{-6} ~ 6.20×10^{-6}), $w(\text{Th})$ (0.51×10^{-6} ~ 28.91×10^{-6}), $w(\text{Ta})$ (0.47×10^{-6} ~ 9.91×10^{-6})], $\Sigma\text{REE} = (29.56 \times 10^{-6}$ ~ $812.59 \times 10^{-6})$, Nb 元素明显亏损 [$w(\text{Nb})$ (2.94×10^{-6} ~ 36.01×10^{-6})]; $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{TiO}_2$ 比值为 0.10 ~ 5.54, Zr/Y 比值为 1.93 ~ 5.67, La/Nb 比值为 0.54 ~ 1.73, La/Ta 比值为 5.53 ~ 11.13, Nb/U 比值为 1.51 ~ 14.23, 地球化学特征类似于大陆拉斑玄武岩, 同时具有板内碱性玄武岩性质。碳酸岩与变辉长岩互层出现, $\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO})$ 均值为 0.98, $w(\text{MgO})$ 均值为 0.62, $w(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO})$ 均值为 0.41, 为钙质偏镁质碳酸岩, 明显富集 Sr 元素 [$w(\text{Sr})$ ($1\,727 \times 10^{-6}$ ~ $1\,794 \times 10^{-6}$)]. 杂岩体岩浆可能来自软流圈富集地幔的部分熔融, 形成于大陆板内深大断裂带拉张的构造背景, 并在上升过程中与地壳物质发生一定程度的同化混染作用。变辉长岩的锆石绝大多数具有核边结构, 其核部色泽大多呈黑色, 难以观察其内部结构, 少数核部可见较宽的振荡环带, Th/U 比值为 0.23 ~ 4.19, 具基性岩浆成因锆石特点, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄

收稿日期/Received: 2024-05-11; 修订日期/Revised: 2024-10-17; 出版日期/Published: 2025-02-25

基金项目: 中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基基金项目 (QCJJ2022-20)

第一作者: 臧兴运 (1969—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事区域地质、成矿规律与隐伏矿体预测等方面的研究。

E-mail: zangxingyun01@163.com

* 通信作者: 王永胜 (1969—), 男, 学士, 研究员, 主要从事区域地质、矿产地质工作。E-mail: jlwangysh@163.com

© Editorial Office of World Geology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

为 $(2\,098 \pm 11)$ Ma (MSWD = 1.2, $n = 18$), 代表了辉长岩冷凝固晶年龄; 其边部色泽相对较浅且均一, 无环带, Th/U 比值为 0.03 ~ 3.22, 为变质成因锆石特点,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为 $(1\,892 \pm 23)$ Ma (MSWD = 2.2, $n = 14$), 代表了辉长岩变质年龄。结合区域地质资料, 认为胶—辽—吉造山带东部在古元古代中期处于伸展构造环境, 大兴铁矿区变辉长岩-碳酸岩杂岩体的形成可能与松江—崇善断裂带拉张作用有关。

关键词: 变辉长岩; 碳酸岩; 古元古代; 大兴铁矿区; 胶—辽—吉造山带; 吉林省

中图分类号: P595; P597 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.01.001

New record of Paleoproterozoic tectonic activity in eastern Jiao-Liao-Ji Orogenic Belt: implications from metamorphic gabbro-carbonatite complex in Daxing iron mining area, Jilin Province

ZANG Xingyun^{1,2}, LÜ Peng¹, WANG Jusheng^{1,2}, LI Bin^{1,2}, YAN Dong^{1,2}, SUN Weiguo¹,
LI Aopeng¹, WANG Yongsheng^{1,2} *

1. Geological Survey Institute of Jilin Province, Changchun 130102, China;

2. Northeast Geological Science & Technology Innovation Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: In order to constrain the tectonic evolution of the eastern part of the Jiao-Liao-Ji Orogenic Belt, the authors carried out a study on the petrogenesis and diagenetic tectonic background of the metamorphic gabbro-carbonatite complex in the Daxing iron mining area by using petrology, petrochemistry, petrogeochemistry and zircon U-Pb dating. The results show that the metamorphic gabbro-carbonatite complex in the Daxing iron mining area has the rock types of meta-gabbro, carbonatite and magnet ore body, and the meta-gabbro is the main rock type. Petrochemical study of the meta-gabbro showed that the $w(\text{SiO}_2)$ is from 44.23% to 48.80%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ is from 0.94% to 2.86%, $w(\text{K}_2\text{O})$ is from 0.51% to 1.90%, $w(\text{TiO}_2)$ is from 0.42% to 0.93%, $w(\text{CaO})$ is from 8.73% to 14.78%, and the $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ratio ranges from 1.12 to 2.27, $\text{MgO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ ratio ranges from 0.54 to 0.60, $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ni}^{2+})/(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}^{2+})$ ratio ranges from 1.44 to 2.02, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ ratio ranges from 0.60 to 0.68, and the differentiation index (DI) ranges from 11.76 to 31.79. The meta-gabbro rocks are basic-ultrabasic magma which is rich in iron and sodium, poor in potassium and titanium, and weak in differentiation. Geochemical studies show that the rocks are rich in large ion lithophile elements such as Rb, Ba [$w(\text{Rb}) (4.80 \times 10^{-6} - 74.82 \times 10^{-6})$, $w(\text{Ba}) (83.09 \times 10^{-6} - 430.10 \times 10^{-6})$], and relatively rich in high field strength elements such as Hf, Th, Ta [$w(\text{Hf}) (1.41 \times 10^{-6} - 6.20 \times 10^{-6})$, $w(\text{Th}) (0.51 \times 10^{-6} - 28.91 \times 10^{-6})$, $w(\text{Ta}) (0.47 \times 10^{-6} - 9.91 \times 10^{-6})$], and $\sum \text{REE} = (29.56 \times 10^{-6} - 812.59 \times 10^{-6})$; while, Nb is obviously depleted [$w(\text{Nb}) (2.94 \times 10^{-6} - 36.01 \times 10^{-6})$]. The $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{TiO}_2$ ratio is 0.10 - 5.54, Zr/Y ratio is 1.93 - 5.67, La/Nb ratio is 0.54 - 1.73, La/Ta ratio is 5.53 - 11.13, Nb/U ratio is 1.51 - 14.23. The geochemical characteristics are similar to continental tholeiitic basalts, and having the properties of intra-plate alkaline basalts. The carbonatite and meta-gabbro are interbedded. The average $\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO})$ ratio is 0.98, mean $w(\text{MgO})$ is 0.62, and mean $w(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO})$ is 0.41. It is calcareous metamagmatic carbonatite which obviously rich in Sr [$w(\text{Sr}) (1\,727 \times 10^{-6} - 1\,794 \times 10^{-6})$]. The complex magma may come from the partial melting of the asthenosphere enriched mantle, formed in the tectonic background of the stretching of the deep fault zone in the continental plate, and assimilated and mixed with crustal materials in a certain extent during the ascent. Most of the meta-gabbro zircons have the core-rim structure, the color of the core is mostly black. It is difficult to observe its internal structure, a few of the core can be seen wide oscillating bands.

The Th/U ratio is 0.23–4.19, which shows the characteristics of basic magmatic zircon. The weighted average age of $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ of the core is $(2\,098 \pm 11)$ Ma (MSWD = 1.2, $n = 18$), which represents the condensation crystallization age of the gabbro. The color at the rims of the zircons is relatively light and uniform, without zonation, and the Th/U ratio is 0.03–3.22, indicating metamorphic origin. The weighted average age of $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ of the rims is $(1\,892 \pm 23)$ Ma (MSWD = 2.2, $n = 14$), which represents the metamorphic age of gabbro. Combined with regional geological data, it is considered that the eastern part of the Jiao–Liao–Ji Orogenic Belt was in a extensional tectonic environment in the Middle Paleoproterozoic, the formation of metamorphic gabbro-carbonatite complex in the Daxing iron mining area may be related to the extension during the tectonic evolution of the Songjiang–Chongshan fault zone.

Keywords: meta-gabbro; carbonatite; Paleoproterozoic; Daxing iron mining area; Jiao–Liao–Ji Orogenic Belt; Jilin Province

0 引言

胶—辽—吉造山带是龙岗地块上一个重要的横跨胶东、辽宁、吉林的构造单元,可划分为南、北部两个次一级构造单元,南部发育古元古界荆山岩群(胶东)、南辽河岩群(辽宁)、集安岩群(吉林),变质程度为高角闪岩相–麻粒岩相;北部发育古元古界粉子山岩群(胶东)、北辽河岩群(辽宁)、老岭岩群(吉林),变质程度为绿片岩相–低角闪岩相^[1-4]。

目前,对造山带构造属性存在不同认识,主要有:①裂谷模式,构造演化为大陆板内裂谷开启闭合过程^[5-6];②大洋模式,构造演化为弧陆碰撞或陆陆碰撞过程^[7-10];③造山带为在简单剪切模式作用下形成的一共轭大陆边缘对^[11]。

造山带经历了复杂的构造演化和变质、变形作用的改造过程,留下了多种多样的岩石学记录。其中,以斜长角闪岩为主的基性–超基性岩的研究占有重要地位,在探讨大地构造过程方面具有重要意义,其化学成分是划分岩石类型、成因及确定古构造环境的重要依据,还能提供产生这种岩石的地幔源区的组成和化学演化信息^[12-13]。该类岩石在辽宁桓仁^[14]、海城^[12]、黑沟^[15]、昌隆^[16]等地的北辽河岩群中均有发现,但在吉林省老岭岩群内尚未见相关报道,限制了对该区域构造演化的认识。

笔者在老岭岩群中识别出变辉长岩–碳酸岩杂岩体,针对岩石学、锆石 U–Pb 同位素年龄和岩石地球化学等特征,分析其原岩类型、年龄、源区性质及成岩成矿机制,为胶—辽—吉造山带地质构造演化历史研究提供新的地质信息。

1 区域地质概况

胶—辽—吉造山带进入吉林省后,在仙人桥镇附近被长白山新生代玄武岩覆盖,其北缘集安–抚松北东向断裂带在覆盖区内逐渐转为近东西向并被北东向鸭绿江断裂带截断,于松江镇一带重新出露地表并由近东西向逐渐转为北西向,又称为松江–崇善断裂带^①(图1a)。在长白山玄武岩覆盖区东部边缘,四合村–奶头山村一带断续分布一些大理岩(古元古界老岭岩群珍珠门岩组)、石英岩(古元古界老岭岩群达台山岩组)等变质岩,并被大面积后期花岗岩(晚二叠世花岗闪长岩、二长花岗岩,早侏罗世碱长花岗岩)侵入(图1b)。松江–崇善北西向断裂带北东以新太古代花岗闪长岩和新太古界官地岩组变粒岩等为主,局部被新生代玄武岩覆盖(图1b)^{②-④}。

大兴铁矿分布于老岭岩群珍珠门岩组中,相同层位的还有小黄泥屯铁矿,二者相距约10 km(图1b)。

① 王永胜,臧兴运,冯德臣,等. 吉林省长白山玄武岩覆盖区及周边矿产资源调查报告. 长春:吉林省地质调查院,2022.

② 郑建祥,吴永波,徐永汶,等. 吉林白头山幅1:20万区域地质调查报告. 长春:吉林省地质局直属专业综合大队,1974.

③ 庄传芳,汤石林,权宁吉,等. 吉林两江地区1:5万区域地质调查报告. 长春:吉林省地质矿产局黄金地质调查所,1983.

④ 于宏斌,刘耀文,王延生,等. 吉林长白县幅1:25万区域地质调查报告. 长春:吉林省地质调查院,2007.

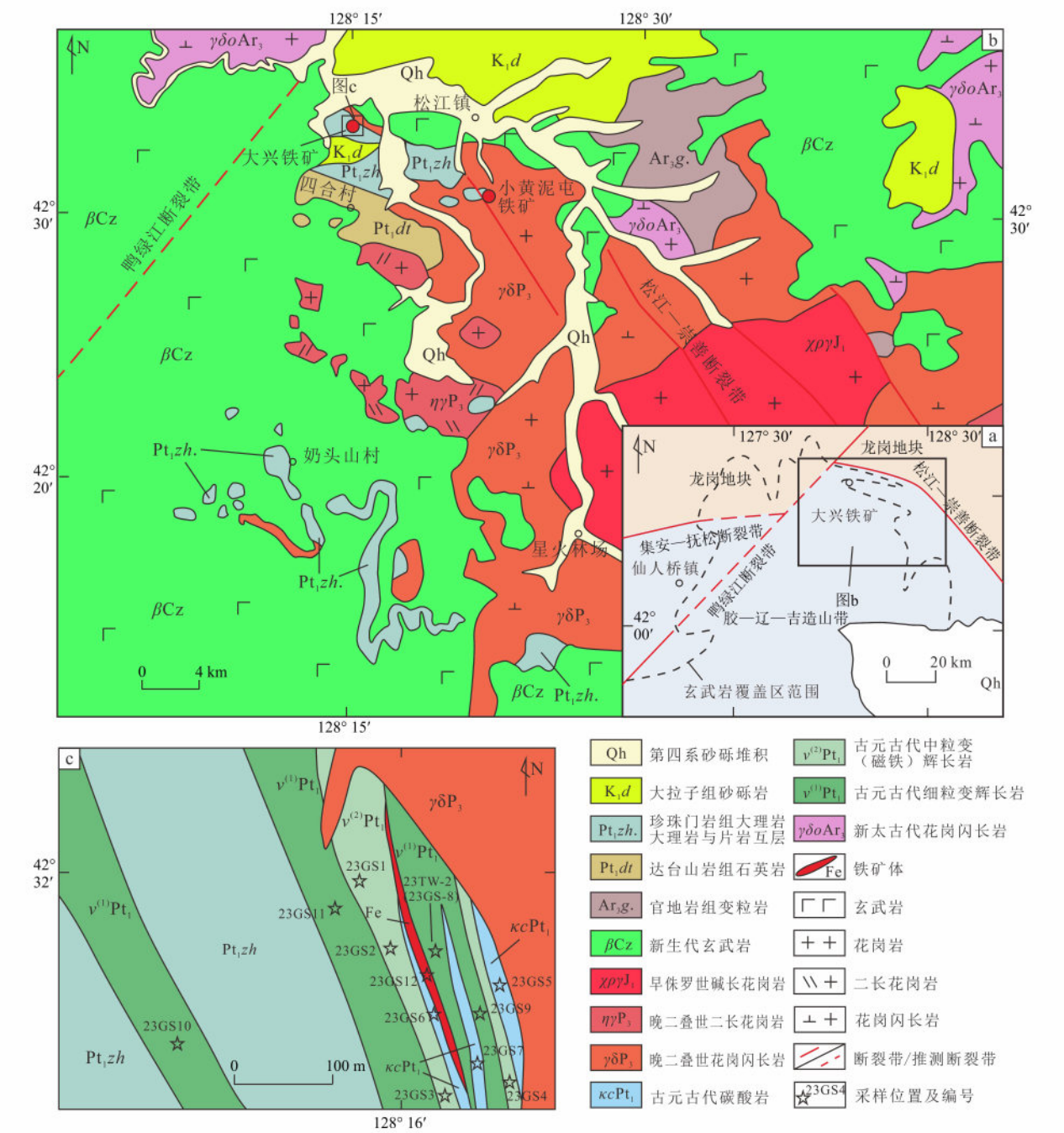


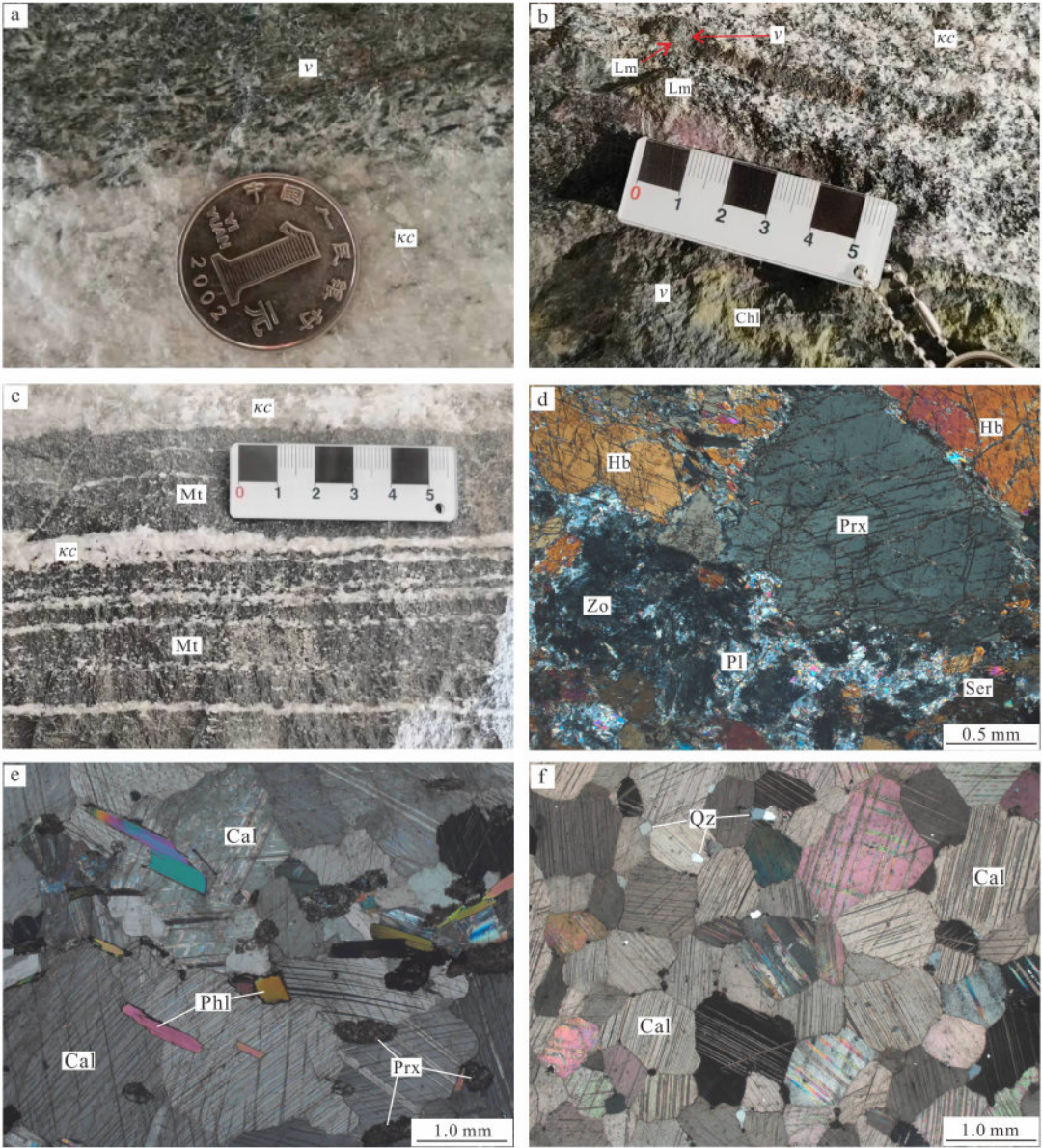
图 1 胶一辽一吉造山带东部构造格架图 (a), 长白山玄武岩覆盖区东部区域地质图 (b) 和大兴铁矿区地质简图 (c)
Fig.1 Tectonic framework of eastern Jiao-Liao-Ji Orogenic Belt (a), regional geological map of eastern margin of Changbaishan basalt covered area (b) and simplified geological map of Daxing iron mining area (c)

① 王永胜, 臧兴运, 冯德臣, 等. 吉林省长白山玄武岩覆盖区及周边矿产资源调查报告. 长春: 吉林省地质调查院, 2022.

2 岩石学特征

大兴铁矿区变辉长岩-碳酸岩杂岩体呈北西向岩床状分布, 顺层侵入珍珠门岩组中 (图 1c), 结

合野外观察以及室内镜下观测, 将杂岩体岩石类型按照岩相学定名为中粒变 (磁铁) 辉长岩、细粒变辉长岩、以及少量碳酸岩和磁铁矿体 (图 2)。



v. 辉长岩; κc. 碳酸岩; Lm. 褐铁矿; Chl. 绿泥石; Mt. 磁铁矿; Prx. 辉石; Hb. 角闪石; Pl. 斜长石; Ser. 绢云母; Zo. 黝帘石; Cal. 方解石; Phl. 金云母; Qz. 石英。
a. 碳酸岩涌动式侵入中粒变辉长岩; b. 碳酸岩脉动式侵入中粒变辉长岩, 变辉长岩具褐铁矿化、绿泥石化蚀变 (烘烤边), 碳酸岩内长条状变辉长岩捕虏体具褐铁矿化边 (暗化边); c. 铁矿石, 方解石与磁铁矿互层; d. 中粒变辉长岩的变余辉长结构, 辉石多已蚀变为角闪石, 斜长石已绢云母化、黝帘石化, 但仍具有板柱状外形; e. 碳酸岩, 他形 (半自形) 粒状结构, 含有较多的金云母等矿物; f. 碳酸盐岩, 粒状变晶结构, 含少量石英。

图 2 大兴铁矿区主要岩石类型

Fig. 2 Main rock types in Daxing iron mining area

中粒变(磁铁)辉长岩:前人^{①-③}定名为斜长角闪岩,为杂岩体主要岩石类型。新鲜面呈黑色(图2a、b),变余辉长结构(图2d),嵌晶含长结构,粒状柱状变晶结构,显微片麻状构造。矿物粒度0.5~2.5 mm,主要矿物成分有角闪石(65%~70%)、斜长石(10%~15%)、磷灰石(3%~5%),其他矿物(石英、磁铁矿、绿帘石、方解石等),约为5%~10%。角闪石表面具有绿泥石化,定向排列,镜下观察大多仍保留辉石粒状外形,局部见有残余辉石(图2d);斜长石绢云母化、黝帘石化严重,但仍可见板柱状外形(图2d),个别颗粒见有聚片双晶。局部磁铁矿体积分数>10%,岩石可定名为中粒变(磁铁)辉长岩(图1c)。

细粒变辉长岩:前人^{①-③}定名为变粒岩,呈岩床状分布,与中粒变辉长岩呈涌动式接触关系,规模较小,分布于中粒变辉长岩边部。新鲜面呈灰黑色,岩石学特征基本同中粒变辉长岩,但矿物粒度较小(0.1~1.0 mm),角闪石体积分数约75%,斜长石体积分数约10%,磷灰石、磁铁矿、方解石和橄榄石等矿物约占15%。

碳酸岩:与变辉长岩互层出现(图1c),二者接触关系可见涌动式(图2a)、脉动式(图2b)。他形(半自形)粒状结构(图2e,薄片取自于图2a标本),块状构造。矿物粒度约0.5~2.5 mm,方解石+白云石矿物约占90%,金云母、橄榄石和菱铁矿等矿物约占10%。

磁铁矿体:条带状,可见与碳酸岩互层状产出(图2c),或与中粒变辉长岩呈渐变过渡接触关系。

碳酸盐岩:前人^{①-③}将其与矿区内出露的碳酸岩统称为大理岩,具有明显的粒状变晶结构(图2f),粒度为0.05~0.30 mm,除碳酸盐矿物外,仅含极少量石英(<1%)。在矿区中与片岩互层,局部含炭,岩石组合与区域上珍珠门岩组下部相同。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 定年结果

采集1件用于锆石测年研究的样品(编号23TW-2, 128°16'02" E, 42°31'57" N),为中粒变辉长岩。

样品在河北省廊坊区域地质调查研究所采用常

规方法进行粉碎至80~100目,并用常规浮选和磁选方法进行分选,在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒作为测定对象。将锆石颗粒粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后,对其表面进行抛光至锆石内部暴露,然后进行反射光和透射光照相。锆石的反射光和透射光显微照相及阴极发光显微照相在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心采用GATAN公司Chroma阴极发光探头HTACHI S-3000N扫描电镜完成。根据锆石反射光和透射光显微照片进行初选,再与阴极发光图像反复对比,力求避开内部裂隙和包体以及不同成因的区域,以期获得较准确的年龄信息。

锆石 U-Pb 测年在吉林大学自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室利用LA-ICP-MS分析完成。激光剥蚀系统为德国COMPEX公司生产的GeoLasPro型193nmArF准分子激光器,与激光器联用的是Agilent 7900型ICP-MS仪器。实验中采用He作为剥蚀物质的载气。分析时采用直径为32 μm、频率为7 Hz的激光束斑进行样品分析。锆石年龄计算均采用国际标准锆石91500作为外标,元素含量采用美国国家标准物质局人工合成的硅酸盐玻璃NIST SRM610作为外标。

测试结果通过GLITTER4.0软件计算得出同位素比值和²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb/²³⁵U、²⁰⁶Pb/²³⁸U的年龄值,实验获得的数据采用Andersen^[18]软件进行同位素比值的校正以扣除普通Pb的影响,年龄计算及谐和图采用IOSPLOT3.0软件完成。详细的实验分析步骤和数据处理方法见文献[19~20]。同位素比值和年龄的误差均在1σ。锆石 U-Pb 定年结果如表1所示。

由阴极发光图像CL(图3)可以看出,样品中锆石自形程度稍差,以半自形为主,并有明显的

① 郑建祥,吴永波,徐永汶,等.吉林白头山幅1:20万区域地质调查报告.长春:吉林省地质局直属专业综合大队,1974.

② 庄传芳,汤石林,权宁吉,等.吉林两江地区1:5万区域地质调查报告.长春:吉林省地质矿产局黄金地质调查所,1983.

③ 于宏斌,刘耀文,王延生,等.吉林长白县幅1:25万区域地质调查报告.长春:吉林省地质调查院,2007.

表 1 大兴铁矿区中粒变辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of meta-gabbro in Daxing iron mining area

点号	10^{-6} $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
01	80.66	30.10	2.68	0.133 85	0.004 09	6.871 57	0.205 65	0.371 66	0.008 13	2 149	25
04	312.52	182.44	1.71	0.131 09	0.004 13	6.816 38	0.210 08	0.376 65	0.008 29	2 113	26
07	355.18	435.98	0.81	0.129 49	0.003 12	6.777 65	0.159 69	0.379 37	0.007 69	2 091	19
08	307.67	665.79	0.46	0.129 81	0.002 84	6.782 16	0.144 66	0.378 74	0.007 49	2 095	17
09	65.85	124.65	0.53	0.128 73	0.003 37	6.763 73	0.172 64	0.380 94	0.007 86	2 081	20
10	241.85	266.67	0.91	0.132 70	0.002 96	6.860 37	0.149 07	0.374 86	0.007 44	2 134	17
13	96.15	99.00	0.97	0.128 40	0.003 66	6.732 20	0.186 25	0.380 38	0.008 01	2 076	23
14 *	1 603.83	639.55	2.51	0.119 67	0.004 77	6.408 89	0.248 46	0.388 59	0.009 23	1 951	37
18	289.36	190.9	1.52	0.129 83	0.002 98	6.805 77	0.150 20	0.380 57	0.007 50	2 096	17
19	534.22	399.79	1.34	0.131 20	0.002 80	6.793 58	0.138 57	0.375 96	0.007 27	2 114	16
20	592.35	440.61	1.34	0.131 79	0.002 90	6.823 26	0.143 77	0.375 95	0.007 32	2 122	16
21	576.05	464.43	1.24	0.127 67	0.002 87	6.753 97	0.144 98	0.384 19	0.007 49	2 066	17
22	1 089.63	579.13	1.88	0.128 52	0.002 90	6.772 27	0.145 93	0.382 72	0.007 46	2 078	17
23	581.63	392.9	1.48	0.129 00	0.002 81	6.783 78	0.140 54	0.381 97	0.007 38	2 084	16
28	17.21	74.56	0.23	0.130 41	0.003 80	6.794 19	0.189 33	0.378 50	0.007 89	2 103	23
33	1 585.26	378.35	4.19	0.128 52	0.004 88	6.736 05	0.245 94	0.380 84	0.008 81	2 078	34
34	964.27	275.53	3.50	0.130 14	0.004 42	6.790 03	0.220 92	0.379 13	0.008 34	2 100	29
37	193.38	229.17	0.84	0.129 15	0.005 29	6.768 10	0.266 53	0.380 78	0.009 14	2 086	37
40	169.95	483.89	0.35	0.129 36	0.003 51	6.713 95	0.172 36	0.377 11	0.007 57	2 089	21
02	17.82	112.56	0.16	0.115 04	0.004 46	4.597 85	0.173 57	0.289 39	0.006 72	1 881	36
03	20.62	84.35	0.24	0.121 51	0.003 79	5.001 04	0.152 14	0.298 06	0.006 46	1 979	26
05 *	6.20	47.15	0.13	0.122 23	0.010 60	5.042 34	0.423 69	0.298 87	0.011 37	1 989	96
06	27.63	85.38	0.32	0.114 04	0.004 54	4.593 72	0.177 78	0.291 92	0.006 82	1 865	38
11	81.03	95.57	0.85	0.121 80	0.004 43	4.983 12	0.175 61	0.296 75	0.006 73	1 983	32
12	2 117.25	657.00	3.22	0.115 74	0.002 54	4.582 75	0.097 37	0.287 22	0.005 64	1 891	17
15	16.75	80.35	0.21	0.113 20	0.003 46	4.633 62	0.137 19	0.297 04	0.006 28	1 851	26
16	34.99	99.34	0.35	0.115 11	0.003 47	4.655 87	0.135 37	0.293 59	0.006 17	1 882	25
17	2.97	30.97	0.10	0.113 47	0.004 96	4.576 47	0.193 57	0.292 78	0.007 07	1 856	43
24	1 030.55	403.03	2.56	0.116 79	0.002 67	4.602 62	0.100 03	0.286 26	0.005 56	1 908	17
25	9.66	66.58	0.15	0.114 34	0.004 44	4.680 95	0.175 28	0.297 39	0.006 78	1 870	36
26 *	117.43	118.05	0.99	0.136 73	0.003 43	5.992 22	0.143 10	0.318 37	0.006 34	2 186	19
27	23.99	110.75	0.22	0.114 78	0.003 63	4.605 66	0.139 70	0.291 52	0.006 14	1 876	27
29 *	46.37	68.77	0.67	0.121 56	0.004 46	5.032 60	0.177 00	0.300 79	0.006 73	1 979	33
30	18.37	106.92	0.17	0.113 82	0.005 15	4.672 47	0.203 68	0.298 27	0.007 28	1 861	45
31	0.24	9.02	0.03	0.116 84	0.009 72	4.659 08	0.374 64	0.289 76	0.010 56	1 908	92
32 *	4.42	63.69	0.07	0.105 57	0.006 00	3.977 41	0.218 31	0.273 77	0.007 40	1 724	62
35	26.59	171.23	0.16	0.113 62	0.002 85	4.654 93	0.110 03	0.297 70	0.005 80	1 858	19
36 *	115.41	128.13	0.90	0.124 06	0.003 80	5.075 85	0.147 76	0.297 30	0.006 18	2 015	25
38 *	38.33	97.92	0.39	0.123 44	0.004 00	5.082 39	0.156 69	0.299 19	0.006 33	2 007	27
39 *	73.68	133.83	0.55	0.118 26	0.003 93	4.661 00	0.147 33	0.286 38	0.006 07	1 930	29

注: * 表示未参与谐和年龄计算。测试单位为吉林大学自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室; 测试仪器为德国 COMEX 公司生产的 GeoLasPro 型 193nmArF 准分子激光器, 与激光器联用的是 Agilent 7900 型 ICP-MS 仪器; 测试时间为 2024 年 2 月。

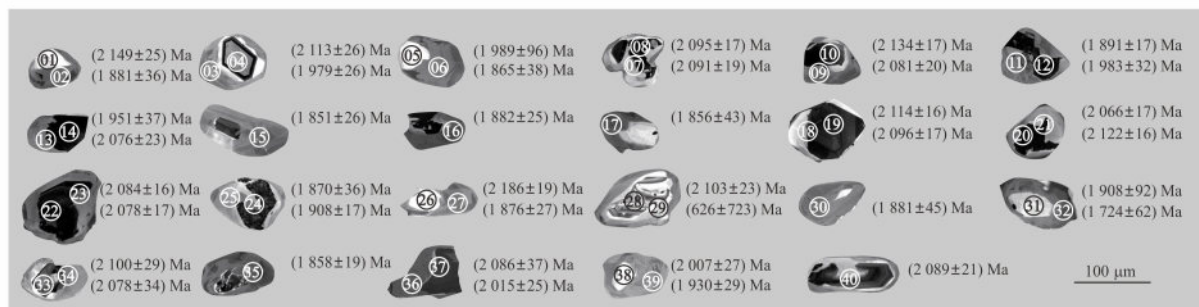


图3 大兴铁矿区中粒变辉长岩的锆石 CL 图像

Fig. 3 CL images of zircons of meta-gabbro in Daxing iron mining area

破损现象, 颗粒较小, 粒径在 $50 \sim 150 \mu\text{m}$ 之间, 长宽比为 $(2:1) \sim (4:1)$ 。绝大多数锆石具有核边结构, 其核部色泽大多呈黑色, 难以观察其内部结构, 少数核部可见较宽的振荡环带, 为基性岩浆成因锆石特点^[21-23]; 而其边部色泽相对较浅且均一, 无环带, 为变质成因锆石特点^[24]。

采用 LA-ICP-MS 测定了 23 个单颗粒锆石 (表 1; 图 3), 共计 40 个点, 经分析锆石测年结果获得 2 个年龄区间。

第 1 组年龄区间由 19 个点 (表 1 中 1、4、7、8、9、10、13、14、18、19、20、21、22、23、28、33、34、37、40 点) 组成, 14 号测点年龄数据 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄值明显偏低, 可能是由于测点位置锆石表面破碎, 封闭体系被破坏而造成放射性成因铅发生不同程度丢失 (获得) 引起。其余 18 个测点获得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 $(2\,098 \pm 11) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.2$, $n = 18$), 并分布在谐和线附近 (图 4a、c)。由图 3 可知, 测点以锆石核边结构的“核部”为主, Th/U 比值 $0.23 \sim 4.19$, 平均值 1.44 (表 1), 反映其岩浆成因锆石特点^[25-26], 因此该年龄值应该代表了中粒变辉长岩冷凝固结年龄。

第 2 组年龄区间由 21 个点 (表 1 中 2、3、5、6、11、12、15、16、17、24、25、26、27、29、30、31、32、35、36、38、39 点) 组成, 26、36、38 点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄明显偏高 (表 1), 5、29、32、39 点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 三组表面年龄相差较大, 可能是由于测点位置锆石表面破碎, 封闭体系被破坏而造成放射性成因铅 (铀) 发生不同程度丢失 (获得) 引起。其余 14 个测点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 三组表面年龄

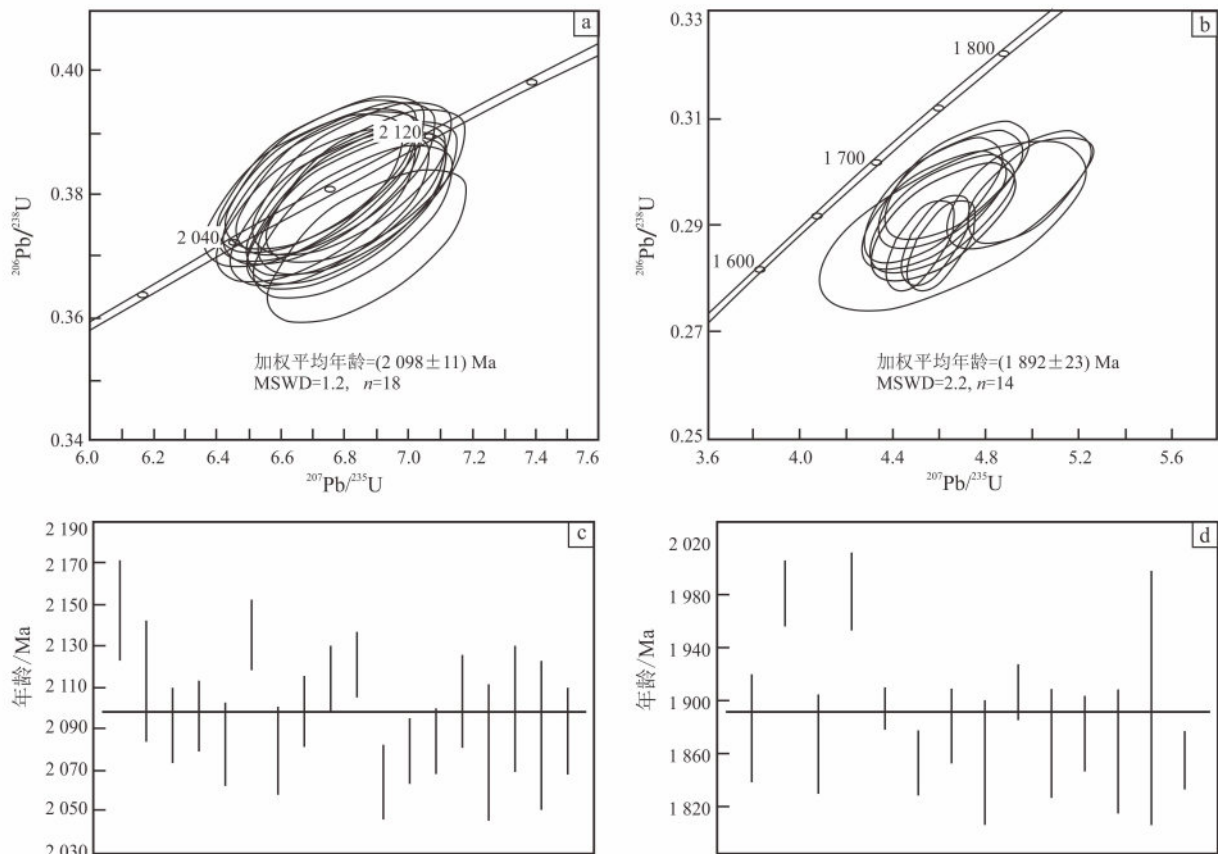
较稳定且相差不大, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $(1\,892 \pm 23) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 2.2$, $n = 14$), 分布在谐和线附近 (图 4b、d)。由表 1 所示, Th/U 比值 $0.03 \sim 3.22$, 平均值 0.62 ; 如图 3 所示, 测点以锆石核边结构的“边部”为主, 为锆石变质成因部分, 因此该年龄值应该代表了中粒辉长岩变质年龄。

综上, 锆石核部 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 $(2\,098 \pm 11) \text{ Ma}$ 应代表了中粒辉长岩的形成时间; 锆石边部 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 $(1\,892 \pm 23) \text{ Ma}$ 应代表了中粒辉长岩的变质时间, 均为古元古代。

3.2 主量元素特征

在大兴铁矿区共采集 12 件主量样品 (表 2), 其中中粒变辉长岩 4 件, 细粒变辉长岩 4 件, 碳酸岩 3 件, 磁铁矿石 1 件, 采样位置如图 1 所示 (样品 23GS8 采样位置与锆石 U-Pb 测年样品 23TW-2 为同一位置)。分析测试工作在吉林大学测试实验中心完成, 主量元素的测定采用 X-射线荧光光谱仪 (PW1401/10), 相对标准偏差为 $2\% \sim 5\%$ 。

如表 2 所示, 8 件变辉长岩样品 $w(\text{SiO}_2)$ 在 $44.23\% \sim 48.80\%$ 之间, 平均为 46.37% , 为基性岩偏超基性范畴; $w(\text{Na}_2\text{O})$ 在 $0.94\% \sim 2.86\%$ 之间, 平均为 1.89% ; $w(\text{K}_2\text{O})$ 在 $0.51\% \sim 1.90\%$ 之间, 平均为 1.05% ; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 在 $1.12 \sim 2.27$ 之间, 平均为 1.89 , 具有富钠、低钾特征; $w(\text{TiO}_2)$ 在 $0.42\% \sim 0.93\%$ 之间, 平均为 0.68% ; $w(\text{CaO})$ 在 $8.73\% \sim 14.78\%$ 之间变化 (这可能与斜长石的绢云母化有关); 镁铁比值 $m/f = (\text{Mg}^{2+} + \text{Ni}^{2+}) / (\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}^{2+})$ 为 $1.44 \sim 2.02$, 为富铁质基性-超基性岩^[27-28]; $w(\text{MgO})$ 为 $8.76\% \sim 12.84\%$, 平均为 10.90% , $\text{Mg}^\# = \text{Mg}/$



a. 核部谐和图; b. 边部谐和图; c. 核部加权平均年龄分布图; d. 边部加权平均年龄分布图。

图 4 大兴铁矿区中粒变辉长岩锆石 U-Pb 定年图解

Fig. 4 Zircon U-Pb dating diagrams of meta-gabbro in Daxing iron mining area

($\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}$) 为 0.60 ~ 0.68, 略低于原始岩浆镁值 (0.68 ~ 0.75), 这说明岩浆接近于原始岩浆, 与深部地幔有关, 且镁铁质矿物的分异作用不明显^[12]; $\text{MgO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ 的比值介于 0.54 ~ 0.60 之间, 相对于原始地幔的 $\text{MgO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ 比值 (0.68 ~ 0.72) 要低, 说明其原生岩浆与原始地幔有一定差别^[29], 推测其在岩浆演化过程中存在地壳物质的混染熔融; 分异指数 (DI) 介于 11.76 ~ 31.79, 表明结晶分异作用较弱。在 TAS 图解中细粒变辉长岩样品落入橄榄辉长岩-辉长岩区域内, 中粒变辉长岩样品落入碱性辉长岩-辉长岩区域内 (图 5a); $w(\text{SiO}_2)$ -AR [碱度率 $\text{AR} = (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} - \text{K}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O})$] 投图, 样品均落在碱性系列区 (图 5b)。总体上, 岩石呈现出偏碱性的富铁、钠, 低钾、钛的基性-超基性岩浆特征, 分异作用较弱。

矿区内碳酸岩中方解石 + 白云石矿物约占 90%, 大于 50%; 如表 2 所示, 3 个样品 $w(\text{SiO}_2)$ 均在 1.27% ~ 1.54%, 小于 20%, 符合碳酸岩定义^[32]。根据碳酸岩中 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO})$ 以及碱质之间的质量百分比可将碳酸岩划分为 4 类: ①钙质碳酸岩, $\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}) > 0.8$; ②镁质碳酸岩, $\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}) < 0.8$, 且 $w(\text{MgO}) > w(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO})$; ③铁质碳酸岩, $\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}) < 0.8$, 且 $w(\text{MgO}) < w(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO})$; ④碱质碳酸岩, $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 较高。研究区碳酸岩 $\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO})$ 为 0.79 ~ 3.41, 均值为 0.98, 略大于 0.8, 同时 $w(\text{MgO})$ 均值为 0.62, $w(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO})$ 均值为 0.41, 为钙质偏镁质碳酸岩。

表 2 大兴铁矿区岩石主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Analysis results of major, trace and rare earth elements of rocks in Daxing iron mining area

样品	细粒变辉长岩				碳酸岩			中粒变辉长岩				铁矿石
	23GS1	23GS2	23GS3	23GS4	23GS5	23GS6	23GS7	23GS8	23GS9	23GS10	23GS11	23GS12
SiO ₂	47.56	44.48	45.42	44.23	1.27	1.30	1.54	46.95	48.80	46.79	46.71	9.65
TiO ₂	0.55	0.42	0.93	0.52	0.02	0.02	0.02	0.83	0.70	0.79	0.67	2.36
Al ₂ O ₃	8.44	7.08	7.99	7.01	0.73	0.66	0.74	15.55	14.32	15.90	15.72	45.61
Fe ₂ O ₃	4.90	4.95	4.56	4.79	0.04	0.20	0.15	3.11	2.20	2.83	2.63	20.52
FeO	9.31	8.66	10.17	9.83	0.31	0.15	0.23	6.73	6.05	6.38	6.38	5.89
MnO	0.25	0.29	0.26	0.26	0.06	0.05	0.05	0.17	0.16	0.15	0.17	2.27
MgO	12.18	12.84	11.80	12.41	0.57	0.55	0.74	8.76	9.25	9.74	10.19	0.13
CaO	10.83	14.78	12.02	13.98	53.70	54.21	53.69	9.94	9.64	8.73	10.61	0.08
Na ₂ O	1.93	0.94	1.53	1.15	0.01	0.01	0.01	2.42	2.86	2.13	2.17	0.20
K ₂ O	0.89	0.51	1.11	0.66	0.12	0.15	0.19	1.36	1.02	1.90	0.95	0.04
P ₂ O ₅	0.52	1.41	1.30	2.01	0.05	0.05	0.05	0.07	0.06	0.07	0.06	0.19
LOI	2.19	3.34	2.51	3.08	42.67	42.47	42.27	3.62	4.45	4.34	3.36	13.09
Total	99.57	99.70	99.60	99.93	99.57	99.82	99.68	99.51	99.52	99.73	99.62	100.03
Mg#	0.61	0.64	0.60	0.61	0.75	0.75	0.78	0.62	0.67	0.66	0.68	0.01
Co	48.70	45.64	47.96	62.81	2.06	2.01	9.07	57.59	53.69	59.18	67.94	68.38
Ni	142.30	112.20	141.10	109.10	11.17	12.66	184.00	161.30	219.40	195.50	385.60	118.90
Rb	13.92	4.80	21.74	7.58	6.04	6.80	9.97	46.84	39.89	74.82	33.90	12.36
Sr	121.60	178.00	115.50	153.90	760.00	727.00	794.00	305.90	217.50	240.60	317.50	126.00
Y	49.65	42.23	87.76	60.66	5.49	4.96	4.25	10.55	9.53	7.96	9.33	13.79
Zr	213.40	157.00	169.10	158.50	7.93	8.21	9.11	57.19	49.20	45.16	45.27	29.66
Nb	22.28	6.13	36.01	19.07	0.55	0.63	0.43	4.03	3.92	6.54	2.94	2.90
Ba	148.00	83.09	236.30	97.44	150.70	183.50	130.70	312.10	249.90	430.10	189.90	90.65
La	228.60	94.55	89.11	132.90	2.66	2.77	2.14	6.10	6.79	3.54	4.95	6.16
Ce	371.80	198.50	198.60	277.70	3.92	3.87	3.30	14.20	14.42	9.35	12.62	17.56
Pr	35.58	23.88	24.99	32.77	0.59	0.60	0.47	1.87	1.87	1.35	1.74	2.18
Nd	114.30	91.60	99.90	125.80	2.56	2.52	1.95	8.49	8.04	6.26	7.91	9.15
Sm	16.71	16.04	19.45	22.60	0.53	0.48	0.40	2.15	1.95	1.69	1.97	1.92
Eu	3.29	2.89	3.55	3.87	0.18	0.18	0.15	0.87	0.82	0.73	0.80	0.58
Gd	16.04	14.73	19.53	21.20	0.71	0.59	0.46	2.52	2.31	1.91	2.18	2.12
Tb	1.90	1.78	2.81	2.60	0.11	0.09	0.07	0.39	0.34	0.31	0.34	0.33
Dy	9.90	8.68	16.37	13.17	0.67	0.53	0.47	2.33	2.07	1.81	2.11	1.92
Ho	1.92	1.64	3.35	2.54	0.16	0.13	0.11	0.47	0.41	0.38	0.43	0.41
Er	5.56	4.54	9.64	6.82	0.43	0.38	0.34	1.29	1.17	1.03	1.18	1.08
Tm	0.80	0.59	1.41	0.92	0.06	0.05	0.04	0.19	0.16	0.15	0.16	0.16
Yb	5.33	3.57	9.02	5.65	0.31	0.26	0.23	1.12	1.03	0.91	1.06	0.83
Lu	0.85	0.58	1.37	0.86	0.05	0.04	0.04	0.18	0.15	0.15	0.16	0.11
Hf	6.20	4.43	5.39	4.68	0.23	0.24	0.27	1.78	1.53	1.46	1.41	0.58
Ta	5.71	0.87	9.91	3.28	0.22	0.24	0.22	0.62	0.61	0.64	0.47	0.41
Pb	15.14	19.45	12.86	14.35	2.33	2.94	2.12	12.25	3.88	5.31	5.75	5.94
Th	28.91	22.87	28.12	25.26	0.88	0.84	0.52	0.87	0.69	0.51	0.82	3.52
U	4.12	4.07	9.82	7.45	1.63	3.92	0.62	0.28	0.53	0.56	0.28	0.49
Zr/Nb	9.58	25.63	4.70	8.31	14.41	13.10	21.13	14.18	12.56	6.91	15.41	10.22
La/Nb	10.26	15.43	2.47	6.97	4.84	4.41	4.97	1.51	1.73	0.54	1.68	2.12
Ba/Nb	6.64	13.56	6.56	5.11	274.05	292.66	303.25	77.41	63.78	65.78	64.64	31.23
Ba/Th	5.12	3.63	8.40	3.86	172.17	219.47	252.90	358.82	363.07	842.84	232.27	25.75
Rb/Nb	0.62	0.78	0.60	0.40	10.99	10.84	23.11	11.62	10.18	11.44	11.54	4.26
Th/Nb	1.30	3.73	0.78	1.32	1.59	1.33	1.20	0.22	0.18	0.08	0.28	1.21
Th/La	0.13	0.24	0.32	0.19	0.33	0.30	0.24	0.14	0.10	0.14	0.17	0.57
Ba/La	0.65	0.88	2.65	0.73	56.68	66.32	60.99	51.16	36.80	121.63	38.36	14.73
ΣREE	812.59	463.56	499.09	649.40	12.91	12.48	10.18	42.15	41.54	29.56	37.62	44.50
δEu	0.61	0.56	0.55	0.53	0.89	1.06	1.05	1.14	1.17	1.23	1.18	0.88
(La/Yb) _N	30.75	18.99	7.09	16.86	6.22	7.71	6.58	3.92	4.73	2.77	3.35	5.31
(La/Sm) _N	8.83	3.81	2.96	3.80	3.23	3.74	3.48	1.83	2.24	1.35	1.62	2.07
(Gd/Yb) _N	2.49	3.41	1.79	3.10	1.91	1.89	1.63	1.87	1.85	1.73	1.70	2.11

注：主量元素质量分数单位为%，微量和稀土元素质量分数单位为 10⁻⁶；测试单位为吉林大学测试实验中心；主量元素测试仪器为 X-射线荧光光谱仪（PW1401/10）；微量元素测试仪器为 Agilent7500A 型耦合等离子体质谱仪；测试时间为 2023 年 12 月。

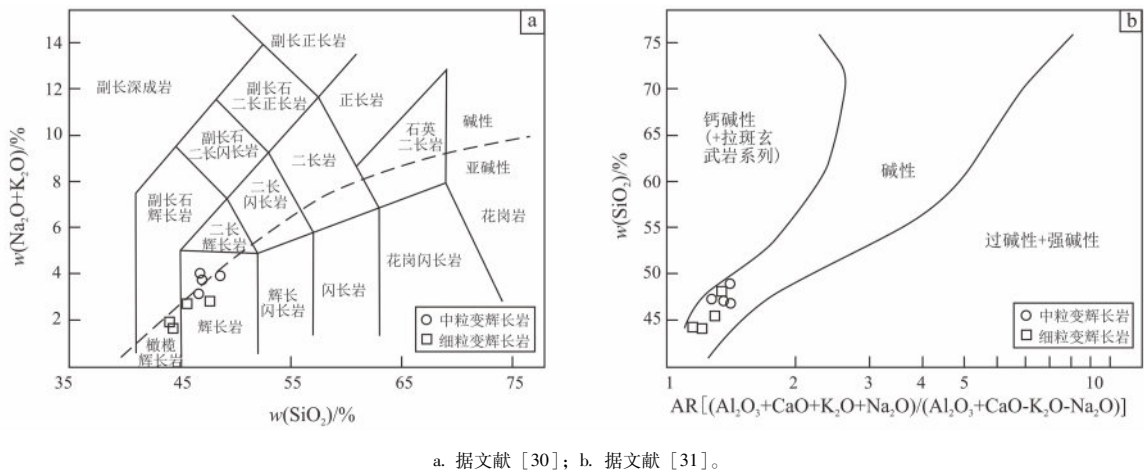


图 5 大兴铁矿区变辉长岩 TAS 图解 (a) 和 $w(\text{SiO}_2) - \text{AR} [(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} - \text{K}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O})]$ 图解 (b)

Fig. 5 TAS diagram (a) and $w(\text{SiO}_2) - \text{AR} [(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} - \text{K}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O})]$ diagram (b) of meta-gabbro in Daxing iron mining area

3.3 稀土、微量元素特征

稀土微量元素样品为主量元素副样, 采用 Agilent7500A 型耦合等离子体质谱仪测试, 绝大多数元素分析精度和准确度优于 5%。

如表 2 所示, 细粒变辉长岩稀土元素总量 $\sum \text{REE} = (463.56 \sim 812.59) \times 10^{-6}$, 轻稀土元素含量 $\text{LREE} = (427.46 \sim 770.28) \times 10^{-6}$, 重稀土元素含量 $\text{HREE} = (36.11 \sim 63.49) \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 6.86 \sim 18.21$ 。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 7.09 \sim 30.75$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 2.96 \sim 8.83$ $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.79 \sim 3.41$, $\delta\text{Eu} = 0.53 \sim 0.61$, 均值为 0.56。

中粒变辉长岩稀土元素总量 $\sum \text{REE} = (29.56 \sim 42.15) \times 10^{-6}$, 轻稀土元素含量 $\text{LREE} = (22.92 \sim 33.89) \times 10^{-6}$, 重稀土元素含量 $\text{HREE} = (6.64 \sim 8.47) \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 3.45 \sim 4.43$ 。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 2.77 \sim 4.73$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 1.35 \sim 2.24$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 2.84 \sim 3.89$, $\delta\text{Eu} = 1.14 \sim 1.23$, 均值为 1.18。

碳酸岩稀土元素总量 $\sum \text{REE} = (10.18 \sim 12.91) \times 10^{-6}$, 轻稀土元素含量 $\text{LREE} = (8.41 \sim 10.43) \times 10^{-6}$, 重稀土元素含量 $\text{HREE} = (1.77 \sim 2.48) \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 4.20 \sim 5.05$ 。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 6.22 \sim 7.71$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 3.23 \sim 3.74$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.63 \sim 1.91$, $\delta\text{Eu} = 0.89 \sim 1.06$, 均值为 1.0。

磁铁矿石稀土特征基本同中粒变辉长岩 (图 6a), 与二者呈渐变过渡接触关系的地质现象相符。

中粒变辉长岩、细粒变辉长岩、磁酸岩之间呈

现涌动式接触关系, 说明它们几乎同时结晶, 主量元素特征表明岩浆结晶分异特征不明显。磷灰石富集 LREE 并常表现为铕负异常的矿物, 细粒变辉长岩具高 LREE 含量、铕负异常的特征, 可能与细粒辉长岩磷灰岩副矿物含量较高有关^[34]; 中粒变辉长岩、碳酸岩、铁矿石的稀土配分图谱基本一致, 呈现出同源演化特征, 曲线较平坦, 轻、重稀土分馏作用不明显, 表明基性岩浆可能源于地幔且未经过充分的分离结晶作用。

微量元素分析结果见表 2, 研究区变辉长岩 Nb/La 介于 0.06 ~ 0.66, 小于 1, 表明基性岩浆遭受到了一定程度的地壳混染作用^[35]。原始地幔标准化蛛网图 (图 6b) 显示, 研究区变辉长岩富集 Rb [$w(\text{Rb})$ 均值为 28.43×10^{-6}] 和 Ba [$w(\text{Ba})$ 均值为 204.16×10^{-6}] 等大离子亲石元素, 高场强元素 Hf、Th、Ta 等相对较为富集 [$w(\text{Hf})$ ($1.41 \times 10^{-6} \sim 6.20 \times 10^{-6}$)、 $w(\text{Th})$ ($0.51 \times 10^{-6} \sim 28.91 \times 10^{-6}$)、 $w(\text{Ta})$ ($0.47 \times 10^{-6} \sim 9.91 \times 10^{-6}$)], $\sum \text{REE} = (29.56 \times 10^{-6} \sim 812.59 \times 10^{-6})$, Nb 元素明显亏损 [$w(\text{Nb})$ ($2.94 \times 10^{-6} \sim 36.01 \times 10^{-6}$)]; Ti 元素强烈亏损, 可能与地壳混染作用有关, 也有可能与钛铁矿、磁铁矿的分异作用有关。细粒变辉长岩 P 元素富集, 而中粒变辉长岩亏损, 可能与磷灰石在细粒变辉长岩中相对富集有关。碳酸岩以明显的富集 Sr 元素 [$w(\text{Sr})$ 均值为 1760.33×10^{-6}] 为特征 (图 6b)。

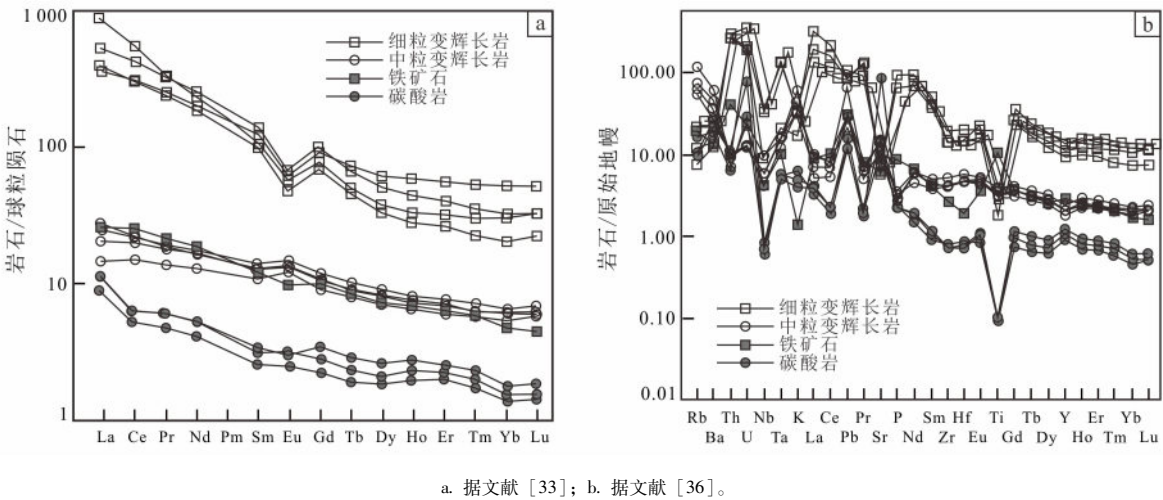


图 6 大兴铁矿区细粒变辉长岩、中粒变辉长岩、铁矿石、碳酸岩的稀土元素球粒陨石标准化配分模式图 (a) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b)

Fig. 6 Chondrite normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams (b) for fine-grained meta-gabbro, medium-grained meta-gabbro, iron ore, carbonatite in Daxing iron mining area

4 讨论

4.1 岩石成因与源区性质

辉长岩目前已成为揭示岩石源区及成因环境的理想火成岩^[37-38]。老岭岩群变质程度为绿片岩相-低角闪岩相^[4]，研究区变辉长岩-碳酸岩杂岩体中碳酸岩保留有岩浆岩的半自形粒状结构 (图 2e)，变辉长岩可识别出辉长结构 (图 2d)，在 TAS 图解中落入橄榄辉长岩-辉长岩区，说明岩石中主量元素变化不大，可基本反映原岩地球化学特征^[13]。

基性岩的 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{TiO}_2$ 比值可用来判断岩浆源区，并且碳酸岩化橄榄岩地幔源区、角闪石岩和碳酸岩化榴辉岩地幔源区三者地幔端元也遵循一定的演化趋势，随着 $w(\text{TiO}_2)$ 的增高，碳酸岩化橄榄岩地幔源区全碱质量分数表现出大幅度的上升趋势，并且 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{TiO}_2 > 1$ ；而角闪石岩和碳酸岩化榴辉岩地幔源区全碱质量分数表现出缓慢上升， $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{TiO}_2 < 1$ ^[39]。由表 2 可知大兴铁矿区变辉长岩 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{TiO}_2$ 比值为 0.1~5.54，均值 3.87；如图 7 所示，大兴铁矿区变辉长岩显示出碳酸岩化橄榄岩部分熔融的源区特征。

在微量元素讨论中采用不活泼的不易受后期热液蚀变和变质作用影响的高场强元素 (Ti、Zr、Y、Nb、Ta、Hf 和 Th)、稀土元素和过渡金属元素

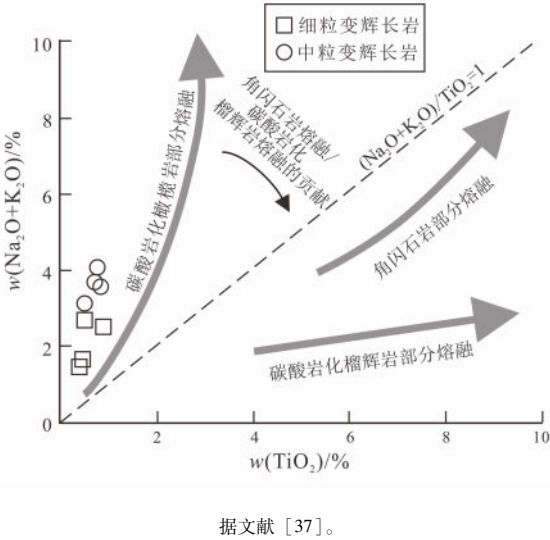


图 7 大兴铁矿区变辉长岩 $w(\text{TiO}_2) - w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$
Fig. 7 $w(\text{TiO}_2) - w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ diagram of meta-gabbros in Daxing iron mining area

(Sc、V、Cr、Ni)^[12]。地幔源区岩石在部分熔融作用过程中 2 个高度不相容元素的比值几乎不变，在此后的岩浆分异过程中变化也不大，因此能够利用这些高度不相容元素的比值来示踪岩浆的源区^[40]。将大兴铁矿区变辉长岩与典型环境不相容元素比值特征做对比 (表 3)^[41-43]，本区的变辉长岩各不相容元素的比值，中粒变辉长岩 Zr/Nb 、

表 3 大兴铁矿区变辉长岩与典型环境不相容元素比值特征对比

Table 3 Comparison of ratio characteristics of incompatible elements between meta-gabbro in Daxing iron mining area and typical environment

元素比	Zr/Nb	La/Nb	Ba/Nb	Ba/Th	Rb/Nb	K/Nb	Th/Nb	Th/La	Ba/La
原始地幔	14. 8	0. 94	9	77	0. 91	323	0. 117	0. 125	9. 6
N-MORB	30	1. 07	1. 7 ~ 8. 0	60	0. 36	296	0. 071	0. 067	4
E-MORB			4. 9 ~ 8. 5			205 ~ 230	0. 06 ~ 0. 08		
大陆壳	16. 2	2. 2	54	124	4. 70	134	10. 44	0. 204	25
HIMU OIB	3. 2 ~ 5. 0	0. 66 ~ 0. 77	4. 9 ~ 6. 5	49 ~ 77	0. 35 ~ 0. 38	79 ~ 179	0. 080 ~ 0. 101	0. 107 ~ 0. 133	6. 8 ~ 8. 7
EM I OIB	4. 2 ~ 11. 5	0. 86 ~ 1. 19	11. 4 ~ 17. 8	103 ~ 154	0. 88 ~ 1. 17	213 ~ 432	0. 105 ~ 0. 122	0. 107 ~ 0. 128	13. 2 ~ 16. 9
EM II OIB	4. 5 ~ 7. 3	0. 97 ~ 1. 09	7. 3 ~ 11. 0	67 ~ 84	0. 59 ~ 0. 85	248 ~ 378	0. 111 ~ 0. 157	0. 122 ~ 0. 163	8. 3 ~ 11. 3
OIB	5. 83	0. 77			0. 65		0. 08	0. 11	9. 46
中粒辉长岩	12. 05	8. 78	7. 97	5. 25	0. 60	391. 73	1. 78	0. 22	1. 23
细粒辉长岩	12. 26	1. 37	67. 90	449. 25	11. 20	2 517. 05	0. 19	0. 14	61. 99

注: N-MORB: 正常型洋中脊玄武岩; E-MORB: 富集型洋中脊玄武岩; OIB: 洋岛玄武岩; HIMU OIB: 纯粹的玄武岩质洋壳; EM I OIB: 有少量深海沉积物的玄武岩质洋壳; EM II OIB: 有少量陆源沉积物的玄武岩质洋壳。

Rb/Nb 与原始地幔成分相近, Ba/Nb 与正常型洋中脊玄武岩相近, Th/Nb 与大陆壳成分相近; 细粒变辉长岩 Zr/Nb、La/Nb、Th/Nb、Th/La 与原始地幔成分相近, Ba/Nb 比值与大陆壳相近。综合推断本区变辉长岩可能产自幔源并受到陆壳物质混染。

Zr 和 Y 的丰度可以直接反映地幔源类型, 富集地幔的 Zr/Y 比值低于 18, 而亏损地幔的比值大于 18^[44]。在本研究区中, Zr/Y 为 1.93 ~ 5.67, 平均值为 4.21, 由此可知该岩浆岩为富集型地幔源。

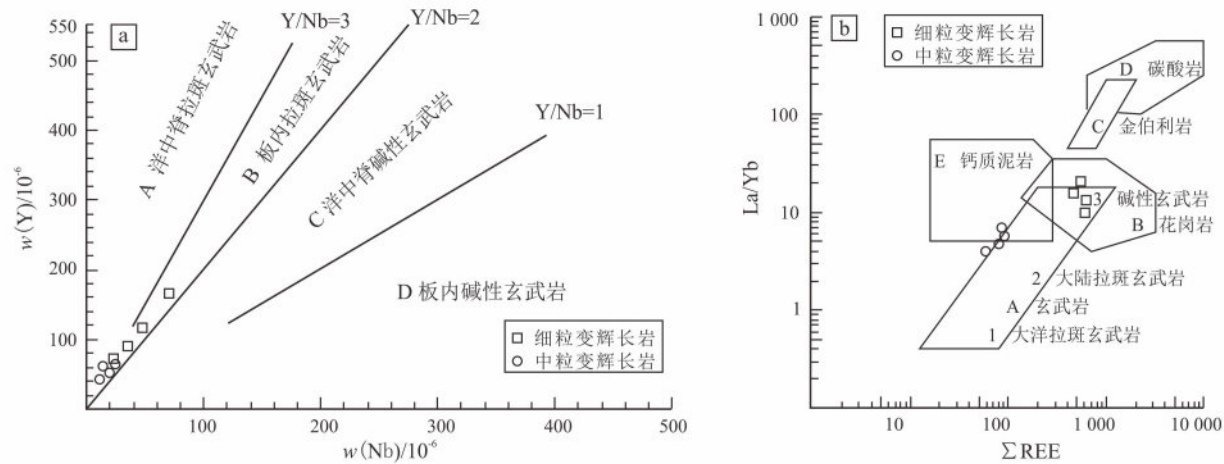
源于软流圈地幔的玄武岩 La/Nb < 1.5, La/Ta < 22, 反之, 则指示源区为岩石圈地幔^[44]。如表 2、3 所示, 研究区细粒变辉长岩磷灰石含量偏高造成 $w(\text{La})$ 较高, 杂岩体主要岩石类型中粒变辉长岩 La/Nb 为 0.54 ~ 1.73, 均值 1.37, < 1.5; La/Ta 为 5.53 ~ 11.13, 均值 = 9.27, < 22, 指示变辉长岩岩浆源区为软流圈地幔。

研究表明, 碳酸岩的物源区与一般意义上的洋岛玄武岩 (OIB) 的源区软流圈地幔基本一致^[45]。关于碳酸岩岩浆的成因有 3 种代表性成因理论: ①直接来源于软流圈地幔或者岩石圈地幔的部分熔融作用 (部分熔融程度 < 1%); ②霞石岩岩浆的分离结晶作用; ③碳酸盐熔体与硅酸不饱和的硅酸盐熔体的液态不混溶作用, 即熔离作用^[46]。源自地幔的碳酸岩岩浆通过分异作用形成, 这类岩石中的矿物主要为碳酸盐矿物、橄榄石、透辉石、斜锆

石、钙钛矿和钛锆钽矿等, 可形成贫 U 的烧绿石、磷灰石和磁铁矿等^[32]。研究区碳酸岩与变辉长岩同源且呈涌动式侵入接触关系, 矿物成分主要有方解石、橄榄石、磷灰石等, 形成磁铁矿体, 也说明碳酸岩岩浆源区可能为软流圈地幔。

典型地幔 Nb/U = 47 ± 10, 大陆地壳 Nb/U = 9 ~ 12^[37]。大兴铁矿区辉长岩 Nb/U = 1.51 ~ 14.23, 平均 7.15, 表明它们不是原生岩浆, 侵入前在岩浆房已经发生一定程度的分离结晶及部分熔融^[37]。

如 Harker 图解 (图 8) 所示, 研究区变辉长岩 $w(\text{MgO})$ 与其他成分之间有一定程度但不十分强烈的相关性。随 $w(\text{MgO})$ 升高, $w(\text{TFeO})$ 、 $w(\text{CaO})$ 相应升高, 呈正相关性; 随 $w(\text{MgO})$ 升高, $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 降低, 呈负相关性; 且 $w(\text{MgO})$ 与微量元素 $w(\text{Cr})$ 、 $w(\text{V})$ 呈负相关性。 $w(\text{TFeO})$ 、 $w(\text{Ni})$ 与 $w(\text{MgO})$ 呈正相关性, 表明在残余岩浆中的 TFeO 及 Ni 含量主要受到镁橄榄石结晶的影响; $w(\text{MgO})$ 与 $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 呈负相关, 表明有斜长石的结晶堆积; $w(\text{MgO})$ 与 $w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{V})$ 呈负相关, 表明变辉长岩形成过程中发生了钛铁矿物的堆积; $w(\text{MgO})$ 与 $w(\text{CaO})$ 的关系不明显, 表明岩浆作用没有发生单斜辉石的堆积作用。这些相关关系也说明该变辉长岩岩浆经历过一定程度的分离结晶作用^[37]。



a. 据文献 [50]; b. 据文献 [51]。

图 10 大兴铁矿区变辉长岩 $w(Y)-w(Nb)$ 图解 (a) 和 $(La/Yb)-\Sigma REE$ 图解 (b)

Fig. 10 $w(Y)-w(Nb)$ diagram (a) and $(La/Yb)-\Sigma REE$ diagram (b) of meta-gabbro in Daxing iron mining area

样品均落入板内拉斑玄武岩区; 利用稀土元素图解进行构造环境判别, 在 $(La/Yb)-\Sigma REE$ 图解 (图 10b) 上, 样品一部分落入大陆拉斑玄武岩区, 一部分落入碱性玄武岩区。

研究区变辉长岩的地球化学特征类似于板内 (大陆) 拉斑玄武岩, 同时具有板内碱性玄武岩性质。碱性玄武岩熔融实验证实, 碱性玄武岩浆可能来自于压力大于 2.0 GPa 的上地幔 (相当于地下 66 km), 形成于能够提供岩浆快速上升的拉张构造环境^[52-53]。在板内大型断裂带拉张初期, 沿断裂带上升的软流圈隆起顶部深度 > 66 km, 其周围岩石圈破裂处上地幔物质减压熔融, 熔融程度低的不相容元素、碱质元素 ($K_2O + Na_2O$) 等率先进入熔体, 形成碱性玄武岩浆; 随着断裂带持续拉张, 软流圈继续隆起, 当顶部深度 < 66 km, 熔融程度较高的其他元素开始大量进入, 碱质元素及其他岩浆不相容元素逐渐被稀释而比例减小, 岩浆性质也由碱性玄武岩质逐渐向拉斑玄武岩质转化。研究区变辉长岩地球化学特征表明其形成于板内大型断裂带拉张构造背景, 且深度应 < 66 km。

碳酸岩可以出现在大陆板内构造环境、造山带或洋岛环境等^[46]。大陆板内拉张岩石圈构造背景的碳酸岩, 由产于板块内部、克拉通边缘或裂谷环境且起源于软流圈地幔的霞石质超基性岩浆经液态

不混溶作用而形成; 造山带环境的碳酸岩, 产于碰撞造山过程中派生的引张岩石圈断裂带, 以单一的透镜状、条带状和似层状碳酸岩体为标志; 洋岛环境, 主要产出新生代碳酸岩^[46]。研究区碳酸岩起源于软流圈富集地幔的部分熔融, 应形成于大陆板内拉张构造背景。

综上, 研究区变辉长岩-碳酸岩杂岩体岩浆可能形成于大陆板内深大断裂带拉张的构造背景。根据其出露位置及产状, 推测控岩构造为胶—辽—吉造山带北缘断裂, 即北西向松江—崇善断裂带 (图 1), 构造位置为龙岗地块边缘。

4.3 成岩成矿机制讨论

约 2 050 Ma 左右, 胶—辽—吉造山带发生第二次拉张作用^[13], 在剧烈拉张的构造背景下, 来自软流圈地幔的基性-超基性岩浆 (碳酸岩化橄榄岩部分熔融) 沿造山带北缘松江—崇善北西向断裂带上侵就位, 并在上侵过程中受到一定程度地壳物质的混染。在温度不断降低、岩浆冷凝固晶过程中, 熔点较高的磷灰石、橄榄石、辉石等矿物先结晶, 形成富含稀土元素的细粒辉长岩; 稍后或同时, 辉石、斜长石等矿物结晶形成富含碱质元素的中粒辉长岩, 其中的碳酸岩矿物、磁铁矿等矿物由于结晶分异作用形成单矿物集合体, 即碳酸岩和磁铁矿体。野外调查发现, 中粒变辉长岩中富含碳酸

岩和磁铁矿等矿物，局部磁铁矿含量较高，形成贫铁矿体。

4.4 区域构造演化意义

研究表明^[54-57]胶—辽—吉造山带内构造岩浆活动频繁、复杂，古元古代中期（2 110 ~ 2 000 Ma）以基性-超基性侵入岩为主，在南、北部构造带都较发育。大兴铁矿区变辉长岩-碳酸岩杂岩体是该时期岩浆事件在吉林省境内北部造山带的反映（表 4）。

关于胶—辽—吉造山带的构造演化模式一直以

来存在大陆裂谷模式和大洋演化模式之争，无论是哪种模式，多数学者都认可胶—辽—吉造山带早期的构造环境为伸展减薄环境。大兴铁矿区变辉长岩-碳酸岩杂岩体形成于拉伸机制的构造环境，支持了前人^[9-12,14,54-57]对胶—辽—吉造山带早期处于伸展构造环境的认识；同时其变质时间也与区域上同期基性-超基性岩基本一致（表 4），也支持了前人^[9-12,54-59]造山带内变质时间为 1 930 ~ 1 850 Ma，~ 1 850 Ma 最终形成统一的华北克拉通基底的认识。

表 4 胶—辽—吉造山带内古元古代中期主要基性-超基性岩一览表

Table 4 List of main mafic-ultramafic rocks in Middle Paleoproterozoic in Jiao-Liao-Ji Orogenic Belt									
序号	地区	围岩	岩石类型 伴生矿产	原岩类型	构造背景	构造环境	成岩年龄/ Ma	变质年龄/ Ma	文献 来源
1	胶东祥山 和于埠	荆山岩群 野头岩组	斜长角闪岩 铁矿	辉长岩	大陆伸展构造背景	大陆裂谷	2 052 ± 23	1 834 ± 23	[47]
2	辽宁桓仁	北辽河岩群 高家峪岩组	斜长角闪岩 斜长角闪岩	低 Ti 拉斑玄武岩 高 Ti 碱性玄武岩	伸展构造环境	弧后盆地	2 158 ± 15 2 173 ± 12	1 870 ± 6 1 861 ± 7	[14]
3	辽宁海城马风	北辽河岩群 浪子山岩组	斜长角闪岩	拉斑玄武岩		大洋岛弧环境			[12]
4	辽东黑沟	北辽河岩群 高家峪岩组	黑云变粒岩	拉斑玄武岩	伸展环境	弧后盆地环境	2 162 ± 6.7	1 847 ± 7.3	[15]
5	辽东岫岩	南辽河岩群 里尔峪岩组	斜长角闪岩	辉长岩	伸展环境	弧后盆地环境	2 166 ± 9.9	1 868 ± 7.9	[10]
6	辽宁宽甸	南辽河岩群 里尔峪岩组	斜长角闪岩	辉长岩			2 166 ~ 2 020	1 870 ~ 1 780	[28]
7	鞍山、 弓长岭	北辽河岩群	变辉长岩	低镁高铁辉长岩 高硅低铁辉长岩	伸展环境		2 110 ± 31		[58]
8	辽东三家子	南辽河岩群 里尔峪岩组	斜长角闪岩	高铁拉斑玄武岩	活动大陆边缘	岛弧环境	2 150	1 850	[59]
9	辽东隆昌	北辽河岩群 里尔峪岩组	斜长角闪岩	辉长岩	伸展环境	弧后盆地环境	2 113 ± 15		[16]
10	吉林大兴	老岭岩群 珍珠门岩组	斜长角闪岩 铁矿	偏碱性辉长岩 碳酸岩	拉伸机制构造环境	龙岗地块边缘	2 098 ± 11	1 892 ± 23	本文

5 结论

（1）大兴铁矿区基性-超基性岩石组合为变辉长岩-碳酸岩，变辉长岩样品的锆石核部 U-Pb 年

龄为（2 098 ± 11）Ma，代表了辉长岩结晶时间；锆石边部 U-Pb 年龄为（1 892 ± 23）Ma，为辉长岩变质时间。

（2）大兴铁矿区变辉长岩具偏碱性的富铁、

钠,低钾、钛的基性-超基性岩浆特征,大离子亲石元素(Rb、Ba等)较富集,高场强元素(Hf、Th、Ta)相对较为富集,Nb元素明显亏损,具备大陆拉斑玄武岩地球化学特征,同时具有板内碱性玄武岩性质;碳酸岩(CaO)/($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO}$)比值平均为0.98,略大于0.8,同时 $w(\text{MgO})$ 均值0.62, $w(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO})$ 均值为0.41,为钙质偏镁质碳酸岩。

(3) 大兴铁矿区基性-超基性岩浆可能来自软流圈富集地幔的部分熔融,并在上升过程中与地壳物质发生一定程度的同化混染作用。

(4) 大兴铁矿区变辉长岩-碳酸岩杂岩体形成于伸展构造机制,其中碳酸岩、磁铁矿体形成于岩浆冷凝结晶过程中的结晶分异作用。

参考文献:

- [1] 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 H C, REN Y W, LU S N, et al. Stratigraphic units and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liao-Ji Orogen [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36(5): 583-598.
- [2] 甘宜成,董永胜,王鹏森,等. 辽东岫岩北部王家堡子一带富铝片麻岩的变质作用及其地质意义[J]. 世界地质, 2019, 38(3): 623-636.
GAN Y C, DONG Y S, WANG P S, et al. Metamorphism and its geological implication of Al-rich gneiss in Wangjiapuzi of northern Xiuyan area, East Liaoning [J]. Global Geology, 2019, 38(3): 623-636.
- [3] 陈木森,董永胜,王鹏森,等. 辽东黄花甸地区古元古代变辉绿岩的特征及成因[J]. 世界地质, 2020, 39(2): 306-322.
CHEN M S, DONG Y S, WANG P S, et al. Characteristics and genesis of Paleoproterozoic metamorphic diabase in Huanghuadian area, eastern Liaoning Province [J]. Global Geology, 2020, 39(2): 306-322.
- [4] 彭游博,刘文彬,赵军,等. 辽南岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及其地质意义:以盖州万福一岫岩龙潭地区三叠纪侵入岩为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(6): 1737-1751.
PENG Y B, LIU W B, ZHAO J, et al. Geochemical

characteristics, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geological significance of southern Liaoning Province pluton: a case study of Triassic pluton in Gaizhou Wanfu-Xiuyan Longtan area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(6): 1737-1751.

- [5] 秦亚. 辽吉古元古代裂谷带构造演化的年代学制约[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
QIN Y. Geochronological constraints on the tectonic evolution of the Liao-Ji Paleoproterozoic rift zone [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [6] 张勇,丁建华,松权衡,等. 东北地区富钴矿床成矿规律、成因类型与远景区预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(3): 693-712.
ZHANG Y, DING J H, SONG Q H, et al. Metallogenic regularity, genetic type and potential prospects of cobalt deposits in Northeast China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(3): 693-712.
- [7] 李富强,董永胜,王鹏森,等. 南辽河群斜长角闪岩的地球化学特征及地质意义:以三家子地区为例[J]. 世界地质, 2017, 36(1): 82-93.
LI F Q, DONG Y S, WANG P S, et al. Geochemical characteristics of amphibolite of South Liaohe Group and their geological significance: a case study of Sanjiazhi area [J]. Global Geology, 2017, 36(1): 82-93.
- [8] 孟恩,王朝阳,刘超辉,等. 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[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(6): 1589-1619.
MENG E, WANG C Y, LIU C H, et al. Geochronology, petrogenesis and constraints on regional tectonic evolution of the meta-volcanic rocks in southeastern Liaodong Peninsula [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(6): 1589-1619.
- [9] 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): 1322-1333.
WANG H C, LU S N, CHU H, et al. Zircon U-Pb age and tectonic setting of meta-basalts of Liaohe Group in Helan area, Liaoyang, Liaoning Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(5): 1322-1333.
- [10] 陈木森. 辽东岫岩地区古元古代变基性岩的成因及

- 地质意义 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- CHEN M S. Petrogenesis and geological significance of Paleoproterozoic metabasic rocks in Xiuyan area, East Liaoning Province [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [11] CUI Y C, LIU J L, MA L, et al. A simple shear model for the asymmetry in the Paleoproterozoic fold belt in Liaodong Peninsula [J]. *Journal Geoscientific Research in Northeast Asia*, 2001, 4 (1): 26–33.
- [12] 马立杰, 崔迎春, 刘俊来, 等. 辽东北辽河群斜长角闪岩的地球化学特征及构造背景 [J]. *山西大学学报 (自然科学版)*, 2007, 30 (4): 515–524.
- MA L J, CUI Y C, LIU J L, et al. Geochemical characteristics and the tectonic setting of amphibolites of the North Liaohe Group in Liaodong area [J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2007, 30 (4): 515–524.
- [13] 李德洪, 臧兴运, 赵华伟, 等. 中国矿产地质志·吉林卷 [M]. 北京: 地质出版社, 2023: 1–3009.
- LI D H, ZANG X Y, ZHAO H W, et al. *Annals of geology of mineral resources of China · Jilin volume* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2023: 1–3009.
- [14] 杨玉伟, 于海峰, 石玉学, 等. 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 [J]. *地质学报*, 2021, 95 (12): 3705–3720.
- YANG Y W, YU H F, SHI Y X, et al. 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 [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95 (12): 3705–3720.
- [15] 杨玉伟, 余超, 苏特, 等. 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 [J]. *地质学报*, 2020, 94 (5): 1397–1412.
- YANG Y W, YU C, SU T, et al. Petrogenesis of the Liaohe Group from the Heigou area in the eastern Liaoning Province: constraints on tectonic of the Liao–Ji Orogenic Belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94 (5): 1397–1412.
- [16] 赵岩, 寇林林, 张朋, 等. 辽东半岛隆昌地区 ~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 [J]. *地球科学*, 2019, 44 (10): 3333–3345.
- ZHAO Y, KOU L L, ZHANG P, et al. Characteristics of geochemistry and Hf isotope from meta-gabbro in Longchang area, Liaodong Peninsula: implications on evolution of the Jiao–Liao–Ji Orogenic Belt [J]. *Earth Science*, 2019, 44 (10): 3333–3345.
- [17] 王朝阳, 孟恩, 李壮, 等. 吉林东南部古元古代中—晚期富钾花岗质岩石的时代、成因及其对区域构造演化的制约 [J]. *世界地质*, 2017, 36 (4): 1031–1053.
- WANG C Y, MENG E, LI Z, et al. Age and petrogenesis of Middle–Late Paleoproterozoic potassium-rich granitic rocks in southeastern Jilin and their constraints on regional tectonic evolution [J]. *Global Geology*, 2017, 36 (4): 1031–1053.
- [18] ANDERSEN T. Correction of common lead in U–Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192 (1/2): 59–79.
- [19] 张万辉, 曹守林, 李小亮, 等. 青海东昆仑野牛沟早侏罗世花岗岩闪长岩岩石成因及构造背景 [J]. *世界地质*, 2024, 43 (4): 479–496.
- ZHANG W H, CAO S L, LI X L, et al. Petrogenesis and geodynamic setting of Yeniuogou Early Jurassic granodiorites in eastern Kunlun, Qinghai Province [J]. *World Geology*, 2024, 43 (4): 479–496.
- [20] 王成志, 董永胜, 王鹏森, 等. 辽东弓长岭—岫岩地区古元古界辽河群变沉积岩的物源及构造背景 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2020, 50 (4): 941–956.
- WANG C Z, DONG Y S, WANG P S, et al. Provenance and tectonic setting of the Paleoproterozoic meta-sedimentary rocks from the Liaohe Group in Gongchangling–Xiuyan area, East Liaoning Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50 (4): 941–956.
- [21] 李惠民, 李怀坤, 陈志宏, 等. 基性岩斜锆石 U–Pb 同位素定年 3 种方法之比较 [J]. *地质通报*, 2007, 26 (2): 128–136.
- LI H M, LI H K, CHEN Z H, et al. Comparison of three methods for baddeleyite U–Pb isotope dating of basic rocks [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26 (2): 128–136.
- [22] 何泽宇, 申俊峰, 王来明, 等. 胶东宋家沟金矿中基性脉岩锆石 U–Pb 年代学、地球化学及其地质意义 [J]. *世界地质*, 2020, 39 (3): 509–528.

- HE Z Y, SHEN J F, WANG L M, et al. LA-ICP-MS U-Pb dating, geochemistry and geological implications of intermediate-mafic dikes in Songjiagou gold deposit, eastern Shandong Province [J]. *Global Geology*, 2020, 39 (3): 509–528.
- [23] 申婷婷, 张立飞, 杨经绥, 等. 超基性岩中锆石年龄的特征和意义: 以西南天山 UHP 蛇纹岩中锆石 U-Pb 年龄为例 [J]. *岩石学报*, 2017, 33 (12): 3783–3793.
- SHEN T T, ZHANG L F, YANG J S, et al. The characteristics and significance of age of zircon from ultramafic rocks: a case study from UHP serpentinites in Chinese southwestern Tianshan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33 (12): 3783–3793.
- [24] 高少华, 赵红格, 鱼磊, 等. 锆石 U-Pb 同位素定年的原理、方法及应用 [J]. *江西科学*, 2013, 31 (3): 363–370.
- GAO S H, ZHAO H G, YU L, et al. Zircon U-Pb isotopic dating of principle, method and application [J]. *Jiangxi Science*, 2013, 31 (3): 363–370.
- [25] 杨泽宇, 李珊珊, 何登洋, 等. 华北克拉通北部密云地区古元古代基性侵入岩形成时代与岩石成因 [J]. *世界地质*, 2021, 40 (4): 772–793.
- YANG Z Y, LI S S, HE D Y, et al. Geochronology and petrogenesis of Paleoproterozoic mafic intrusive rocks in Miyun area of northern North China Craton [J]. *Global Geology*, 2021, 40 (4): 772–793.
- [26] 王越, 曹花花, 赵淑娟, 等. 北秦岭东段二郎坪单元辉长岩成因及其构造意义: 来自锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素的制约 [J]. *世界地质*, 2024, 43 (2): 153–171.
- WANG Y, CAO H H, ZHAO S J, et al. Petrogenesis and tectonic significance of gabbros from Erlangping unit in eastern segment of North Qinling: constrained by zircons U-Pb ages, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes [J]. *World Geology*, 2024, 43 (2): 153–171.
- [27] 代俊峰, 宫磊, 霍永豪. 含矿基性-超基性岩的镁铁比值 [J]. *地质找矿论丛*, 2016, 31 (1): 42–46.
- DAI J F, GONG L, HUO Y H. The Mg/Fe ratio of ore-bearing basic-ultrabasic rocks [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2016, 31 (1): 42–46.
- [28] 陈井胜, 田德欣, 邢德和, 等. 辽宁宽甸地区辽河群里尔峪组基性火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义 [J]. *地球科学*, 2020, 45 (9): 3282–3294.
- CHEN J S, TIAN D X, XING D H, et al. Zircon U-Pb geochronology and its geological significance of the basic volcanic rocks from the Lieryu Formation, Liaoh Group in Kuandian area, Liaoning Province [J]. *Earth Science*, 2020, 45 (9): 3282–3294.
- [29] 钟辉, 傅俊彧. 塔源地区变辉长岩岩石化学地球化学特征及成因 [J]. *地质与资源*, 2006, 15 (1): 42–48.
- ZHONG H, FU J Y. Petrochemistry, geochemistry and genesis of the meta-gabbro in Tayuan [J]. *Geology and Resources*, 2006, 15 (1): 42–48.
- [30] ERIC A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37 (3/4): 215–224.
- [31] WRIGHT J B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite gneiss [J]. *Geological Magazine*, 1969, 106 (4): 370–384.
- [32] 苟瑞涛, 曾普胜, 刘斯文, 等. 碳酸岩分布特征及成矿意义 [J]. *地质学报*, 2019, 93 (9): 2348–2361.
- GOU R T, ZENG P S, LIU S W, et al. Distribution characteristics of carbonatites of the world and its metallogenic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93 (9): 2348–2361.
- [33] BOYNTON W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [M] // HENDERSON P. Rare earth element geochemistry. New York: Elsevier, 1984: 63–114.
- [34] 谢富伟, 郎兴海, 唐菊兴, 等. 拉萨地块南缘晚白垩世角闪辉长岩、花岗斑岩副矿物微量元素特征对成岩成矿的指示 [J]. *岩石学报*, 2019, 35 (7): 2124–2166.
- XIE F W, LANG X H, TANG J X, et al. Trace element geochemistry of zircon, apatite, and titanite of Late Cretaceous hornblende gabbro and granite porphyry in the southern Lhasa Subterranean: implications for petrogenesis and mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35 (7): 2124–2166.
- [35] 杨虎, 王根厚, 李宏伟, 等. 西藏羌塘长蛇山辉长岩岩石学、地球化学特征及构造意义 [J]. *华北地质*, 2022, 45 (4): 80–91.
- YANG H, WANG G H, LI H W, et al. The petrological, geochemical characteristics and tectonic significance

- of Changsheshan gabbro rock in Qiangtang, Tibet [J]. *North China Geology*, 2022, 45 (4): 80–91.
- [36] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42 (1): 313–345.
- [37] 王文佳, 梁月霞, 任文秀, 等. 甘肃北山任家山辉长岩地球化学、年代学及其地质意义 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 2021, 57 (4): 447–459.
WANG W J, LIANG Y X, REN W X, et al. Geochemistry, geochronology and geological significance of the gabbros in Renjiashan, the Beishan, Gansu Province [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2021, 57 (4): 447–459.
- [38] ZENG G, CHEN L H, XU X S, et al. Carbonated mantle sources for Cenozoic intra-plate alkaline basalts in Shandong, North China [J]. *Chemical Geology*, 2010, 273: 35–45.
- [39] LEI W S, XU P, GUO J F, et al. LA-ICP-MS zircon U–Pb dating, geological and geochemical features of Sujishan gabbro pluton, eastern Bogda Mountains, and their tectonic significances [J]. *Geological Review*, 2016, 62 (2): 317–330.
- [40] SAUNDERS A D, NORRIS M J, TARNEY J. Origin of MORB and chemically depleted mantle reservoirs: trace element constraints [J]. *Journal of Petrology*, 1988, Special Lithosphere Issue: 425–445.
- [41] FITTTON J G, JAMES D, KEMPT P D, et al. The role of the lithospheric mantle in the generation of Late Cenozoic basic magmas in the western United States [J]. *Journal of Petrology*, 1988 (Special Lithosphere Issue): 331–349.
- [42] WEAVER B L. Trace element evidence for the origin of ocean island basalts [J]. *Geology*, 1991 (19): 123–126.
- [43] WEAVER B L. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104 (2): 381–397.
- [44] HUANG Y M, HAWKESWORTH C, SMITH I, et al. Geochemistry of Late Cenozoic basaltic volcanism in Northland and Coromandel New Zealand: implications for mantle enrichment processes [J]. *Chemical Geology*, 2000, 164 (3/4): 219–238.
- [45] 杨学明, 杨晓勇. 碳酸岩的地质地球化学特征及其大地构造意义 [J]. *地球科学进展*, 1998, 13 (5): 457–466.
YANG X M, YANG X Y. Geological and geochemical characteristics of carbonatites and their implication for tectonic settings [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1998, 13 (5): 457–466.
- [46] 尹淑苹, 谢玉玲, 侯增谦, 等. 碳酸岩研究进展 [J]. *岩石学报*, 2024, 40 (3): 1003–1022.
YIN S P, XIE Y L, HOU Z Q, et al. A review of research advances on carbonatite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2024, 40 (3): 1003–1022.
- [47] 王惠初, 康健丽, 任云伟, 等. 胶—辽—吉带构造属性与演化阶段新划分: 胶北变质辉长岩的启示 [J]. *岩石学报*, 2021, 37 (1): 185–195.
WANG H C, KANG J L, REN Y W, et al. Tectonic setting and new division of evolution stages of Jiao–Liao–Ji belt: implications from metagabbros in Jiaobei terrane [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37 (1): 185–195.
- [48] PEARCE J A, NORRIS M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979 (69): 33–47.
- [49] PEARCE J A. Trace elements characteristic of lavas from destructive plate boundaries [C] // THORPE R S. *Orogenic andesites and related rocks*. Chichester: John Wiley and Sons, 1982: 528–548.
- [50] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 1–182.
LI C N. *Petrology of microelements of igneous rocks* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992: 1–182.
- [51] 王翠芝, 肖荣阁, 刘敬党. 辽宁翁泉沟橄榄玄武岩的地质地球化学特征及其形成环境 [J]. *地球学报*, 2008, 29 (5): 542–552.
WANG C Z, XIAO R G, LIU J D. Geological and geochemical characteristics and formation environment of the Wenquangou olivine basalt in Liaoning Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29 (5): 542–552.
- [52] 李旭俊, 刘仕承, 严城民. 火山作用对板块构造环境的判别方法 [J]. *云南地质*, 2019, 38 (1): 38–44.

- LI X J, LIU S C, YAN C M. The plate tectonic environment discrimination by volcanism [J]. *Yunnan Geology*, 2019, 38 (1): 38–44.
- [53] 郑海飞, 陈斌, 孙楠, 等. 高压下玄武岩浆的不混溶及其对双峰式火山岩的成因意义 [J]. *岩石学报*, 2003, 19 (4): 745–751.
- ZHENG H F, CHEN B, SUN Q, et al. Immiscibility of basalt magma at high pressure and its significance to the bimodal volcanic rock [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19 (4): 745–751.
- [54] 杨成会, 赵辰, 崔育崧, 等. 辽东半岛盖州市梁屯地区古元古代大理岩的碎屑锆石 U–Pb 定年及地质意义 [J]. *世界地质*, 2018, 37 (4): 1018–1033.
- YANG C H, ZHAO C, CUI Y S, et al. Detrital zircon U–Pb geochronology of Paleoproterozoic marble from Liangtun area of Gaizhou in Liaodong Peninsula and its geological significance [J]. *Global Geology*, 2018, 37 (4): 1018–1033.
- [55] 于嫒, 赵国春, 刘建民, 等. 辽东青城子白云金矿床成矿期构造特征分析 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2021, 51 (6): 1720–1739.
- YU H, ZHAO G C, LIU J M, et al. Analysis structural characteristics of mineralization period in Qingchenzi Baiyun gold deposit in eastern Liaoning [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51 (6): 1720–1739.
- [56] 林成贵, 姚晓峰, 程志中, 等. 辽宁省桃源铅锌矿床成矿物质来源: 硫、铅同位素组成特征 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2021, 51 (1): 81–94.
- LIN C G, YAO X F, CHENG Z Z, et al. Source of ore-forming materials in Taoyuan Pb–Zn deposit in Liaoning Province: characteristics of S and Pb isotopic compositions [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51 (1): 81–94.
- [57] 于晓飞, 公凡影, 李永胜, 等. 中国典型钴矿床地质特征及重点地区矿产资源预测 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2022, 52 (5): 1377–1418.
- YU X F, GONG F Y, LI Y S, et al. Geological characteristics of typical cobalt deposits in China and prediction of mineral resources in the key areas [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52 (5): 1377–1418.
- [58] 董春艳, 马铭株, 刘守偈, 等. 华北克拉通古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 C Y, MA M Z, LIU S J, 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 metagabbro in the Anshan-Gongchangling area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28 (9): 2785–2792.
- [59] 李富强. 辽东三家子地区南辽河群斜长角闪岩的成因及地质意义 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- LI F Q. Genesis and geological significance of amphibolites from South Liaohe Group at Sanjiazhi area, eastern Liaoning Province [D]. Changchun: Jilin University, 2017.