

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.210>



华北克拉通北缘中段多伦地区早二叠世双峰式岩浆作用

李天瑜^{1,2}, 李世超^{1,3*}, 李鹏川⁴, 彭云彪², 那木吉拉², 锥德利², 赵庆英¹, 孙加鹏¹

1. 吉林大学地球科学学院, 吉长春 130061
2. 核工业二〇八大队, 内蒙古包头 014010
3. 自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室, 吉林长春 130061
4. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘要:东大山地区双峰式岩浆岩位于内蒙古多伦县东部, 处于华北板块北缘。岩体由石英二长岩和玄武岩组成。对其开展了全岩地球化学、锆石U-Pb年代学和Hf同位素组成研究。研究结果表明:石英二长岩和玄武岩锆石LA-ICP-MS U-Pb定年结果分别为283±1.6 Ma、280±2.9 Ma, 形成于早二叠世;二者锆石Hf同位素组成整体较相似, 两阶段模式年龄(t_{DM2})普遍较为古老(1760~2354 Ma, 仅玄武岩内测得324 Ma、824 Ma两个较新年龄), 与华北板块基底接近;岩体SiO₂含量在50.64%~65.87%存在明显的间断, 具有双峰式岩浆岩特征, 都相对富K、Na、Al, 亏Ca、Mg, 石英二长岩较玄武岩明显亏损Ti、P, 具有明显的互补迹象。结合前人研究成果, 认为东大山地区双峰式岩浆岩可能是板块俯冲、后撤引起的伸展背景下, 古亚洲洋俯冲板片脱水引起上地幔部分熔融形成的幔源岩浆向上运移、聚集于华北板块之下引起古老基底部部分熔融的产物, 研究区早二叠世期间构造环境为活动大陆边缘。

关键词: 双峰式岩浆岩; 华北板块北缘; 伸展背景; 活动大陆边缘; 早二叠世; 地球化学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2023)08-2888-17

收稿日期: 2021-12-28

Early Permian Bimodal Magmatism in the Duolun Area of the Central Section of the Northern Margin of the North China Craton

Li Tianyu^{1,2}, Li Shichao^{1,3*}, Li Pengchuan⁴, Peng Yunbiao², Na Mujila², Luo Deli², Zhao Qingying¹, Sun Jiapeng¹

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China
2. No. 208 Geological Party, CNNC, Baotou 014010, China
3. Key Laboratory of Mineral Resources Evaluation in Northeast Asia, Ministry of Natural Resources, Changchun 130061, China
4. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: This paper presents petrological, Hf isotopes, geochronological and geochemical study on the early Permian Bimodal magmatites in Duolun area, Inner Mongolia, which is tectonically located in the northern margin of North China Craton, comprising quartz monzonite and basalt. U-Pb dating of zircons from the samples by LA-ICP-MS yield weighed mean $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$ ages of 283±1.6 Ma and 280±2.9 Ma respectively. They have similar Hf isotopes. Hf isotopes t_{DM2} was old generally (from 1760

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 41872234, 41872194); 内蒙古自治区地质勘查基金项目(No. NMKD2015-35); 中国核工业地质局项目(No. 202101, 202203-4, 202204-1)。

作者简介: 李天瑜(1989—), 男, 硕士研究生, 构造地质学专业。E-mail: tyli18@mails.jlu.edu.cn

* 通讯作者: 李世超, E-mail:lsc@jlu.edu.cn

引用格式: 李天瑜, 李世超, 李鹏川, 彭云彪, 那木吉拉, 锥德利, 赵庆英, 孙加鹏, 2023. 华北克拉通北缘中段多伦地区早二叠世双峰式岩浆作用. 地球科学, 48(8):2888—2904.

Citation: Li Tianyu, Li Shichao, Li Pengchuan, Peng Yunbiao, Na Mujila, Luo Deli, Zhao Qingying, Sun Jiapeng, 2023. Early Permian Bimodal Magmatism in the Duolun Area of the Central Section of the Northern Margin of the North China Craton. *Earth Science*, 48(8):2888—2904.

to 2 354 Ma, merely two youngs:324 Ma and 824 Ma) and closed to these reported in ancient basement of North China Plate. The quartz monzonite and basalt exhibit SiO_2 geochemical discontinuity (50.64%~65.87%), showing typically bimodal features. They also significantly enrich K, Na, Al and deplete Ca, Mg. Besides, the quartz monzonite show significantly depletions in Ti and P compared with the basalt, showing complementary relations. This paper, combined with previous data, suggest that Bimodal magmatites are the products of partial melting of the ancient basement of the North China Plate under the background of extension, which was caused by the upward migrating and gathering of the mantle magma formed from partial melting of mantle resulted in dewatering of subducted plate of the ancient Asian Ocean. In the early Permian, Dongdashan area is under the background of active continental margin.

Key words: bimodal magmatites; Northern margin of North China Craton; extension setting; active continental margin; the early Permian; geochemistry.

0 引言

中亚造山带横贯亚洲中部,是全球著名的显生宙增生造山带,也是我国重要的成矿带,一直备受地质学者的关注。前人在与之相关的诸多科学问题上已取得了丰富的研究成果(Xiao *et al.*, 2003, 2009, 2015; Wu *et al.*, 2007, 2011; 邵济安等, 2014; Liu *et al.*, 2017; 刘永江等, 2019; 李世超等, 2020),然而,其古生代期间的构造演化问题至今仍存在极大的争议。争议主要围绕古亚洲洋的闭合时限及位置开展。部分学者认为,古亚洲洋早在泥盆—石炭纪期间就已沿二连—贺根山一带碰撞闭合(邵济安等, 2014; 徐备等, 2014, 2018),整个晚古生代期间,区域上处于造山后的陆内伸展环境,局部地区甚至处于裂陷槽环境;另一些学者则认为,晚古生代期间,区域上仍处于海洋环境,华北板块北缘一带还存在着洋壳俯冲活动,古亚洲洋直至古生代末期—早中生代时期才自西向东剪刀式闭合(王玉净和樊志勇, 1997; 尚庆华, 2004; 李锦轶等, 2007; 陈井胜等, 2008; 王挽琼等, 2013; 董晓杰等, 2016; 关庆彬等, 2016; 张晓飞等, 2016, 2018a, 2018b; 李世超等, 2020)。本文报道了内蒙古多伦县东大山地区早二叠世双峰式岩浆岩体,该岩体位于华北板块北缘,其形成时代正是古亚洲洋构造演化的关键时间节点——早二叠世,该时期介于上述两种观点的闭合时限之间,其大地构造属性可以为区分上述两种观点提供限定。本次工作对多伦地区东大山岩体开展了系统的全岩地球化学、锆石U-Pb年代学和锆石Hf同位素研究,讨论了岩石的可能成因及形成构造背景,为确定研究区及中亚造山带中段早二叠世期间的构造属性提供了可靠的证据,为解决中亚造山带中段闭合时限争论提供约束。

1 地质背景及样品特征

1.1 区域地质背景及研究区地质特征

研究区位于内蒙古多伦县东部东大山地区,大地构造处于华北板块北缘(图1a)。区内第四系覆盖严重,出露地层主要为中元古界白云鄂博群、下二叠统额里图组及下白垩统火山岩系。区内出露侵入岩主要为早二叠世石英二长岩,其次为少量的早白垩世中细粒二长花岗岩(图1b)。

中元古界白云鄂博群呈北东向展布于研究区中东部,其北西侧被下二叠统额里图组及下白垩统火山岩系不整合覆盖,南东侧被早二叠世石英二长岩侵入、残蚀(图1b)。岩性主要为灰色石英片岩,上部夹少量灰黑色碳质板岩;下二叠统额里图组多被剥蚀殆尽,仅在研究区中东部煤窑沟、东大山西部等地零星可见(图1b),主要为一套陆源粗碎屑沉积岩,顶部为深灰色玄武岩;下白垩统火山岩系包括满克头鄂博组、玛尼吐组及义县组,呈北东向分布在研究区北西部,多被第四系覆盖(图1b),整体为一套中酸性火山岩。

早二叠世石英二长岩主要分布在东大山一带,出露面积约 8 km^2 ,前人将其划分到古元古代,本次研究中,依据锆石定年结果将其划分到早二叠世;早白垩世二长花岗岩主要出露在工作区中南部,侵入早二叠世石英二长岩中,多呈小岩体产出,出露面积小。

1.2 样品特征

石英二长岩新鲜面呈浅灰褐色,风化面灰白色,中粒花岗结构,块状构造,主要矿物为斜长石(45%)、碱性长石(35%)、石英(17%)及少量黑云母(3%)(图2a);斜长石呈半自形板状—他形粒状分布,均不同程度高岭土化、绢云母化,粒度0.2~1.2 mm;碱性长石呈半自形板状—他形粒状分布,

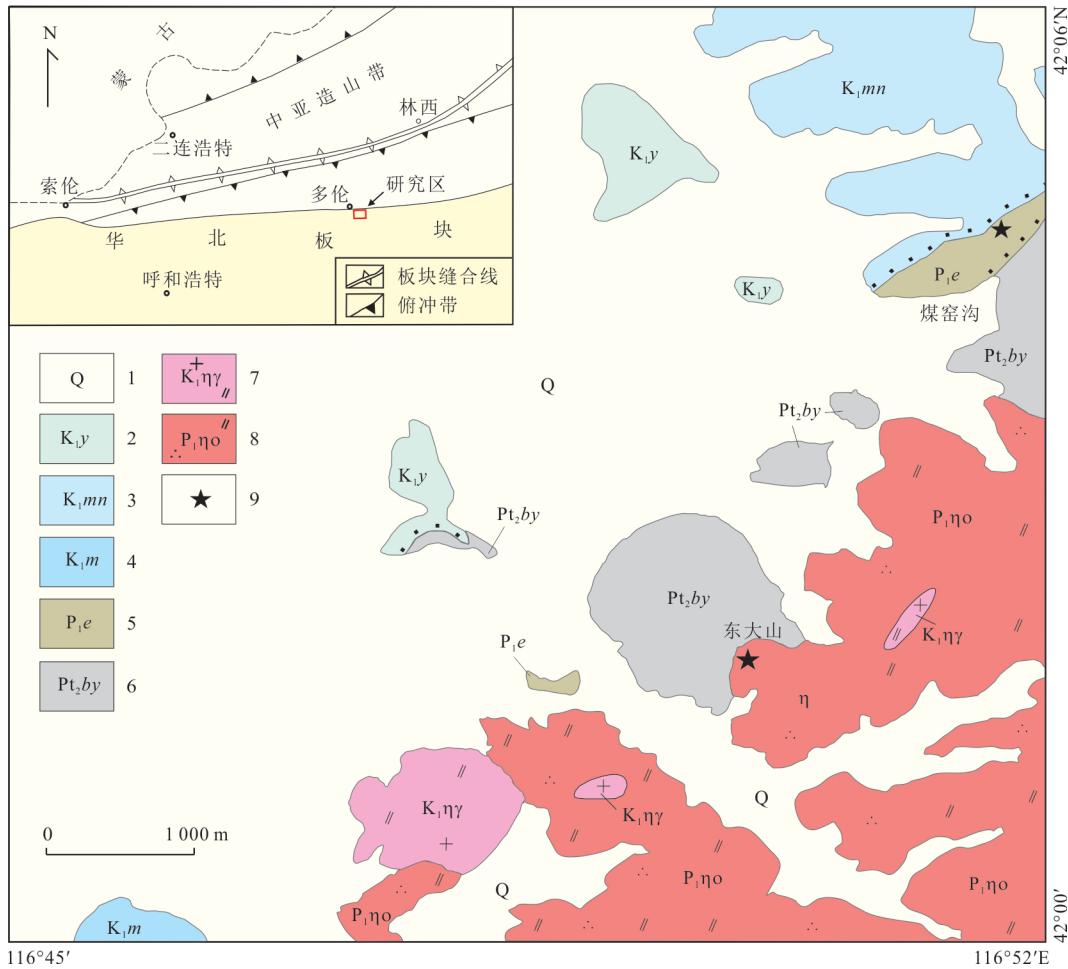


图 1 研究区大地构造背景(a)及地质简图(b)

Fig. 1 Geological regional location(a) and geological sketch map of research area(b)

1. 第四系;2. 下白垩统义县组;3. 下白垩统玛尼吐组;4. 下白垩统克头鄂博组;5. 下二叠统额里图组;6. 中元古界白云鄂博群;7. 早白垩世二长花岗岩;8. 早二叠世石英二长岩;9. 采样点

均已不同程度高岭土化、绢云母化,粒度0.2~1.2 mm;石英呈他形粒状分布于长石矿物颗粒间,粒度0.2~2.0 mm(图2b).

玄武岩新鲜面呈灰黑色,风化面浅灰绿色,斑状结构,块状构造(图2c);斑晶主要为斜长石,呈半自形—它形,粒径多在1~3 mm之间,个别可达5~6 mm,含量约1%,基质主要为斜长石、角闪石微晶,其次为不透明矿物,斜长石普遍高岭土化、钠黝帘石化,角闪石强绿泥石化(图2d).

2 分析方法

2.1 全岩地区化学分析

选取9件新鲜的岩石样品(石英二长岩5件,玄武岩4件)进行全岩主量元素和微量元素成分分析,由国土资源部呼和浩特矿产资源监督检测中心(内

蒙古自治区矿产实验研究所)完成。样品测试流程如下:将样品洗净、烘干、粉碎后用玛瑙钵研磨至小于200目,将粉末分为两份,分别用于主量、微量元素测试。主量元素测试采用X射线荧光光谱法分析(XRF)完成。具体方法为:将样品粉末与试剂(成分为LiF、Li₂B₄O₇、NH₄NO₃)混合均匀后滴入LiBr溶液,放置于熔样机中熔融,冷却后玻璃熔片完成制备。测试分析精度和准确度均优于5%;痕量元素测试采用等离子质谱法(ICP-MS)分析完成。具体方法为:取样品粉末置于Teflon有盖熔样弹中,加入高纯度HF、HNO₃以及HClO₄,将熔样弹置于140℃的电热板之上,并开盖加热至蒸干;再次加入高纯度HF、HNO₃,将熔样弹放入钢套中冷却,放入烤箱中烘烤48 h(190℃);烘烤结束后,擦净熔样弹后置于电热板上开盖蒸干;再加入高纯度HNO₃,并置于电热板(140℃)上蒸干;再次加入1:1 HNO₃,将熔

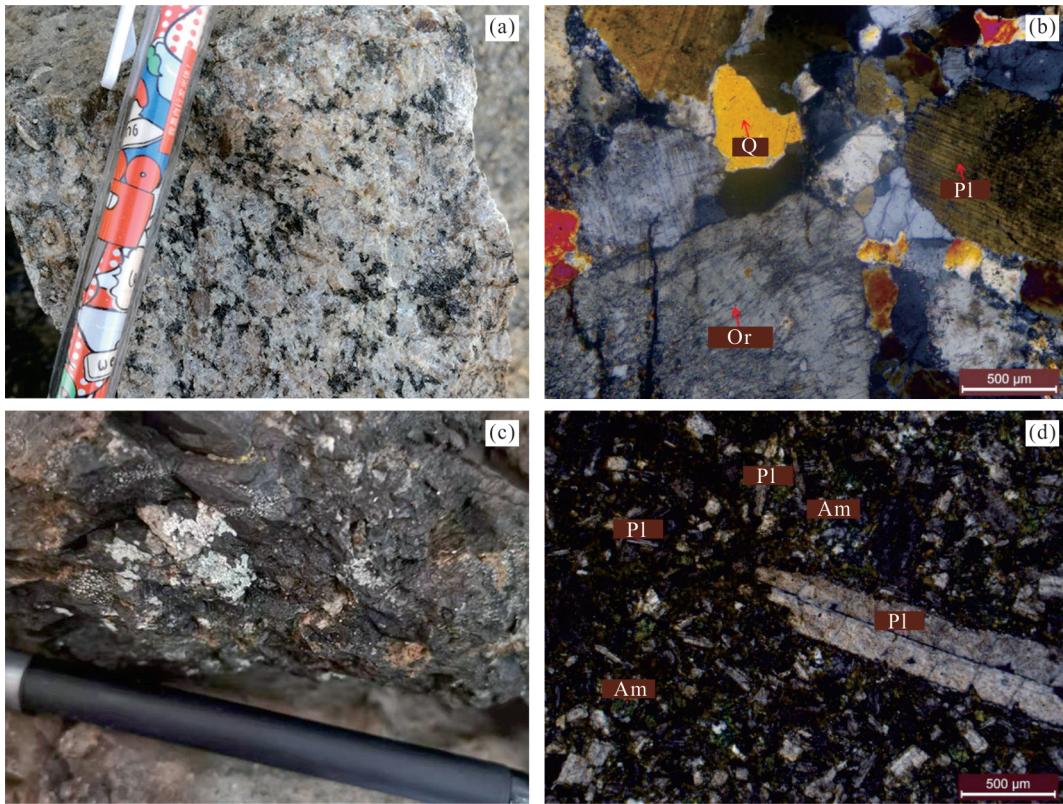


图2 石英二长岩野外(a)及显微照片(b)、玄武岩野外(c)及显微照片(d)

Fig. 2 Photographs of field and micro for the quartz monzonite(a, b) and basalt(c, d)

Q. 石英; Pl. 斜长石; Or. 正长石; Am. 角闪石

样弹装入钢套冷却,拧紧后放入烘箱中烘烤12 h(190 °C);烘干结束取出熔样弹擦净后将样品倒入聚乙烯材质的塑料瓶,加水稀释至80 g定溶,同时加1 g铊作为内标。测试使用的标样为AGV-1和BHVO-1等,分析精度和准确度均优于10%。

2.2 锆石U-Pb年代学及Hf同位素分析

锆石挑选、制靶、照相及U-Pb测年等工作在北京中科矿研检测技术有限公司完成,锆石阴极发光图像在场发射扫描电镜MIRA3上完成,锆石U-Pb定年和Lu-Hf同位素测试在激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)上进行,测试时使用锆石国际标样GJ-1和Plesovice作为参考,Lu-Hf分析微区与锆石定年微区一致,具体测试方法、详细分析步骤见文献(候可军等,2007)。

3 分析结果

3.1 锆石定年及Lu-Hf同位素

根据锆石阴极发光图像(CL)和显微镜下特征,避开含有包裹体、裂隙和杂质的锆石,选取自形程度高、晶形完整、颗粒较大的锆石进行激光剥蚀测

试获取U-Pb年龄数据。本次研究中石英二长岩共选取25颗锆石进行U-Pb测年,锆石表面较光滑、洁净,主要呈自形一半自形柱状,晶型完整,大小约为100~160 μm,其长宽比大部分介于1.2~2.2之间。锆石CL图像显示多数锆石见到震荡环带结构或生长韵律(图3),Th/U值介于0.70~3.56之间(多数为0.9~1.3之间)。玄武岩选取了17颗锆石进行U-Pb测年,锆石多呈半自形—自行长柱状,少数呈短柱状,晶型较完整,大小约为60~190 μm,其长宽比大部分介于1.0~3.5之间;锆石CL图像显示锆石呈板片状或者浑圆状,部分锆石有震荡环带(图3),Th/U值介于0.43~1.20之间(多数为0.7左右)。

样品LA-ICP-MS锆石U-Pb定年结果见表1,石英二长岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在293~278 Ma(1σ)之间,主要集中在286~280 Ma(1σ)之间,加权平均年龄为 283 ± 1.6 Ma(MSWD=0.47),大多数锆石年龄在谐和曲线上(图4a);玄武岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在313~207 Ma(1σ)之间,主要集中在281~274 Ma(1σ)之间,加权平均年龄为 280.0 ± 2.9 Ma(MSWD=0.75),大多数锆石年龄在谐和曲线上



图3 石英二长岩、玄武岩锆石CL图像
Fig. 3 CL images of quartz monzonite and basalt
白圈代表测试位置,数字代表U-Pb、Lu-Hf测试序号

(图4b);二者形成于同一时期,成岩时代为早二叠世。

石英二长岩的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于0.282 132~0.282 401之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在-16.70~-7.27之间,单阶段模式年龄(t_{DM1})和两阶段模式年龄(t_{DM2})分别为1 223~1 583 Ma、1 76~2 354 Ma(表2,图5a);玄武岩的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于0.281 911~0.283 039之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在-13.89~15.23之间,主要集中在-13.89~-10.38段,正高值仅7.47和15.23两个点,单阶段模式年龄(t_{DM1})和两阶段模式年龄(t_{DM2})分别为307~1 498 Ma、324~2 170 Ma,集中在1 337~1 498 Ma、1 956~2 170 Ma之间,仅有324 Ma和824 Ma两个较新二阶段模式年龄(表2,图5b)。

3.2 地球化学

3.2.1 主量元素 样品主量、微量元素分析结果(表

3)可以看出,石英二长岩的 $\text{SiO}_2=65.87\% \sim 67.17\%$,
 $\text{TiO}_2=0.33\% \sim 0.43\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=15.89\% \sim 16.62\%$,
 $\text{MgO}=0.63\% \sim 0.81\%$, $\text{CaO}=1.59\% \sim 1.98\%$, $\text{P}_2\text{O}_5=0.12\% \sim 0.15\%$, $\text{K}_2\text{O}=4.75\% \sim 5.17\%$,全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)= $9.47\% \sim 9.85\%$, $\text{A/CNK}=0.98 \sim 1.04$, $\text{Mg}^\#$ 介于0.23~0.33之间;玄武岩的 $\text{SiO}_2=48.83\% \sim 50.64\%$,
 $\text{TiO}_2=3.08\% \sim 3.24\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=14.63\% \sim 15.81\%$,
 $\text{MgO}=4.07\% \sim 5.14\%$, $\text{CaO}=1.61\% \sim 2.08\%$, $\text{P}_2\text{O}_5=0.85\% \sim 0.91\%$, $\text{K}_2\text{O}=2.68\% \sim 3.44\%$,全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)= $6.60\% \sim 7.16\%$, $\text{A/CNK}=1.28 \sim 1.61$, $\text{Mg}^\#$ 介于0.37~0.44之间;石英二长岩、玄武岩 SiO_2 含量在50.64%~65.87%存在明显的间断,具有双峰式岩浆特征,都相对富K、Na、Al,亏损Ca、Mg,此外,石英二长岩还较玄武岩明显亏损Ti、P;石英二长岩锆石饱和温度为801.76~813.34 °C,介于低温~高温花岗岩

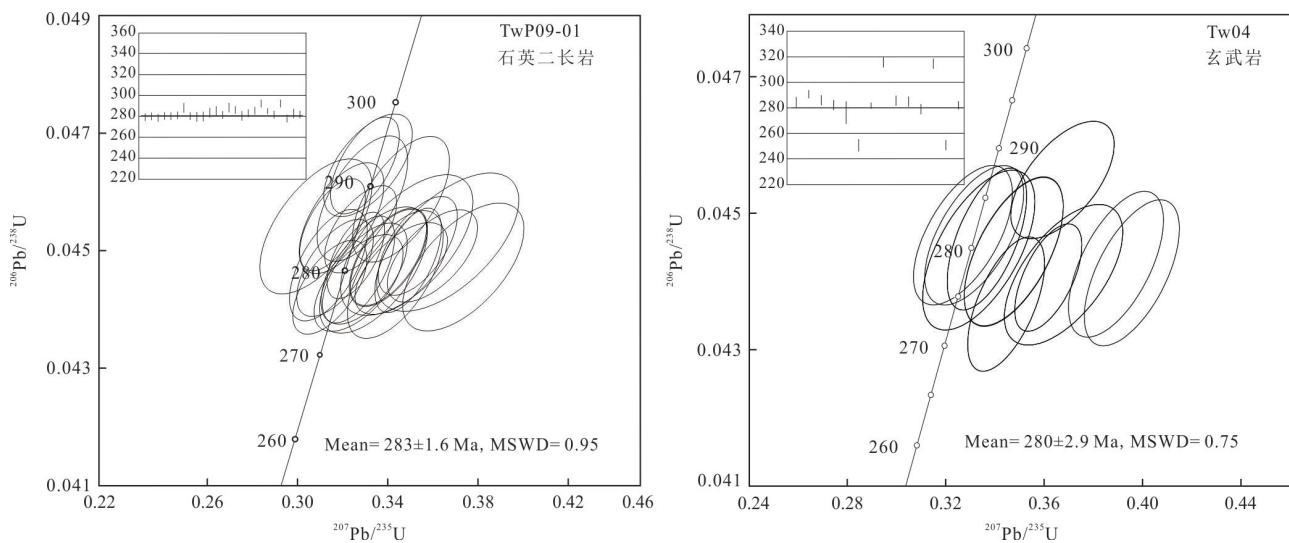


图4 石英二长岩、玄武岩锆石U-Pb谱和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams of zircon for quartz monzonite and basalt

之间(吴福元等,2007a).在TAS侵入岩分类图中,石英二长岩样品均投在石英二长岩范围内(图6a);Zr/

3.2.2 微量元素 石英二长岩稀土元素总量为 $230.012 \times 10^{-6} \sim 321.887 \times 10^{-6}$, LREEs/HREEs 为 $10.06 \sim 13.11$, Eu弱负异常($\delta\text{Eu}=0.54 \sim 0.72$),轻重稀土分馏强烈($(\text{La/Yb})_N=46.15 \sim 53.31$),具有相对富集轻稀土、亏损重稀土元素的右倾型稀土元素配分特征(表3,图7a);玄武岩稀土元素总量为 $165.472 \times 10^{-6} \sim 185.404 \times 10^{-6}$, LREEs /HREEs 为 $6.31 \sim 6.91$, Eu弱负异常($\delta\text{Eu}=0.93 \sim 0.97$, $(\text{La/Yb})_N=5.49 \sim 7.08$),稀土元素配分曲线相对较为平坦,轻微右倾;石英二长岩集稀土元素含量明显更高,轻重稀土分馏强度也远大于玄武岩(表3,图7a).两者皆富集大离子亲石元素Cs、Rb、Ba、K等,相对亏损高场强元素Nb、Ta、U、Hf等,Sr明显亏损.

4 讨论

4.1 形成时代

石英二长岩和玄武岩中的锆石晶型较好,呈自形一半自形,内部结构清晰,震荡环带发育, Th/U 值较高,具有明显岩浆成因锆石特征,测得的年龄均投在协和线及其附近区域,具有较高可靠性,代表了岩浆的结晶年龄,二者的形成时代分别为 283 ± 1.6 Ma、 280 ± 2.9 Ma,为早二叠世晚期,与近年来在研究区西部双旗包村西下二叠统额里图组取得的锆石U-Pb年龄(271 ± 7 Ma)接近;玄武岩样

TiO₂-Nb/Y图解上,玄武岩样品均位于亚碱性玄武岩范围内(图6a).

品中测得的324 Ma的Hf二阶段模式年龄,与锆石定年结果相近,推测为幔源岩浆从地幔分离的时间(吴福元等,2007b).

4.2 岩石成因

石英二长岩主要造岩矿物为碱性长石、斜长石和石英,暗色矿物为黑云母,CIPW标准矿物计算显示,副矿物为磁铁矿、紫苏辉石等;主量元素以富Si、Al、K、Na,贫Ti、Mg、Ca、P为特征,A/CNK为0.97~1.03(<1.1),属于弱过铝质-偏铝质(小于1.1),具有I型花岗岩特征,在I型-A型花岗岩图解上,所有样品点均投影在I型花岗岩区域(图8a),重稀土强烈亏损,可能受岩浆源区影响,富集轻稀土和大离子亲石元素Rb、Ba、K等,亏损高场强元素Nb、Ta、Ti、Hf等,具有岛弧岩浆岩特征;玄武岩主要造岩矿物为斜长石、角闪石,主量元素相对富Al、K、Na、Mg等,较石英二长岩明显富集Ti、P,富集大离子亲石元素Rb、Ba、K等,亏损高场强元素Nb、Ta、Hf、Sm等,Mg[#]值(0.37~0.44)较低,同样具有岛弧岩浆岩特征.

4.3 岩浆起源

石英二长岩具有较高、变化范围较大的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 负值(-16.70~-7.27)及较为古老的Hf二阶段模式年龄(1760~2354 Ma),与研究区南、东部华北板块基底锆石U-Pb年龄相当(初航等,2012;崔玉良等,2019),表明石英二长岩原始岩浆可能来自于华北板块古老基底的部分熔融;玄武岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范

表 1 东大山双峰式岩浆岩中的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results for quartz monzonite and basalt

测点	含量		Th/U	同位素比值						年龄					
	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
石英二长岩															
1	135.1	191	0.82	0.044	0.000 6	0.328	0.014 7	0.054	0.002 4	280	4	288	11	369	106
2	298.5	261	1.26	0.045	0.000 7	0.309	0.013 4	0.051	0.002 2	281	4	274	10	232	102
3	156.3	236	0.82	0.044	0.000 6	0.325	0.015 4	0.053	0.002 4	279	4	286	12	339	104
4	210.2	258	0.99	0.044	0.000 6	0.313	0.013 3	0.052	0.002 3	280	4	276	10	333	100
5	331.4	342	1.31	0.044	0.000 7	0.325	0.012 7	0.053	0.002 0	280	4	285	10	343	90
6	648.7	763	0.99	0.045	0.000 7	0.351	0.011 5	0.057	0.002 0	281	4	305	9	502	71
7	203.8	180	1.39	0.046	0.000 8	0.327	0.015 6	0.052	0.002 6	289	5	287	12	295	139
8	218.3	258	0.94	0.044	0.000 6	0.347	0.016 0	0.057	0.002 7	280	4	302	12	494	106
9	160.7	206	0.93	0.044	0.000 8	0.344	0.016 5	0.057	0.002 7	280	5	300	12	483	107
10	416.3	424	1.26	0.044	0.000 8	0.333	0.018 7	0.054	0.003 0	280	5	292	14	383	122
11	157.1	221	0.97	0.045	0.000 9	0.371	0.024 5	0.060	0.003 7	283	5	320	18	606	140
12	831.6	408	2.86	0.045	0.000 9	0.303	0.019 3	0.049	0.003 4	285	5	269	15	169	156
13	681.7	435	1.90	0.045	0.000 6	0.340	0.013 2	0.056	0.002 1	282	4	297	10	435	83
14	145.6	162	1.05	0.046	0.000 8	0.347	0.016 7	0.055	0.002 6	289	5	302	13	433	104
15	233.0	232	1.31	0.045	0.000 7	0.316	0.014 7	0.051	0.002 4	286	4	279	11	243	107
16	148.4	221	0.78	0.044	0.000 8	0.379	0.020 6	0.062	0.003 4	281	5	326	15	700	117
17	182.3	240	0.93	0.045	0.000 6	0.356	0.013 7	0.058	0.002 3	283	4	309	10	539	92
18	183.6	268	0.88	0.045	0.000 6	0.311	0.011 4	0.051	0.002 0	286	4	275	9	233	95
19	148.9	214	0.85	0.046	0.000 7	0.330	0.015 3	0.052	0.002 4	293	4	289	12	272	105
20	326.3	382	1.06	0.045	0.000 6	0.326	0.012 4	0.052	0.001 9	285	3	286	10	283	83
21	222.9	242	1.07	0.045	0.000 6	0.363	0.015 6	0.059	0.002 6	282	4	315	12	576	127
22	220.3	361	0.70	0.046	0.000 6	0.328	0.011 8	0.051	0.001 8	293	4	288	9	261	75
23	1615	521	3.56	0.044	0.000 6	0.310	0.012 9	0.051	0.002 2	278	4	274	10	256	100
24	156.6	148	1.31	0.045	0.000 9	0.350	0.022 9	0.057	0.003 8	283	6	305	17	498	148
25	362.1	504	0.82	0.045	0.000 6	0.323	0.001 0	0.053	0.001 6	282	3	285	8	309	69
玄武岩															
1	186	256	0.73	0.04	0.000 8	0.34	0.015	0.055	0.002 0	280	5	296	12	433	94
2	351	292	1.20	0.05	0.000 6	0.36	0.016	0.058	0.003 0	287	4	313	12	522	96
3	185	250	0.74	0.04	0.000 8	0.32	0.015	0.053	0.003 0	281	5	282	12	309	119
4	194	272	0.71	0.04	0.000 8	0.36	0.018	0.06	0.003 0	277	5	313	14	611	111
5	170	177	0.96	0.04	0.001 8	0.33	0.047	0.055	0.009 0	271	11	288	36	432	373
6*	112	140	0.80	0.04	0.000 9	0.33	0.026	0.064	0.006 0	243	6	286	20	744	198
7*	788	683	1.15	0.03	0.000 5	0.26	0.008	0.057	0.002 0	207	3	231	6	500	67
8	290	397	0.73	0.04	0.000 8	0.39	0.015	0.065	0.002 0	277	5	337	11	783	78
9*	81	107	0.76	0.05	0.000 9	0.58	0.028	0.084	0.004 0	314	5	462	18	1 302	90
10*	168	248	0.68	0.04	0.000 8	0.33	0.012	0.053	0.002 0	281	5	286	9	324	112
11	201	364	0.55	0.04	0.000 9	0.32	0.018	0.052	0.003 0	280	5	283	13	306	116
12*	873	870	1.00	0.03	0.000 5	0.28	0.009	0.061	0.002 0	208	3	248	7	633	59
13*	1 259	1679	0.75	0.02	0.000 4	0.2	0.006	0.069	0.002 0	135	2	185	5	900	61
14	319	441	0.72	0.04	0.000 7	0.33	0.012	0.056	0.002 0	274	4	293	9	450	76
15*	133	198	0.67	0.05	0.000 9	0.37	0.014	0.054	0.002 0	313	6	318	11	391	93
16*	322	337	0.95	0.04	0.000 8	0.38	0.027	0.072	0.006 0	243	5	324	20	972	159
17	217	509	0.43	0.04	0.000 6	0.35	0.010	0.059	0.002 0	277	4	308	8	561	64

注:标*号的数据因不协和而未参加统计

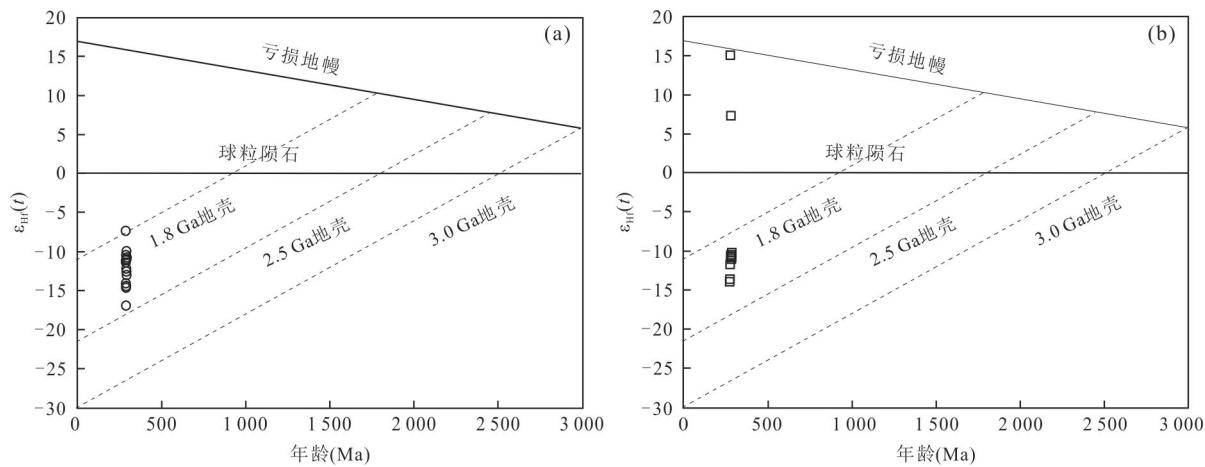
图5 石英二长岩(a)、玄武岩(b)锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -锆石年龄图解Fig. 5 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. zircon ages plots for quartz monzonite and basalt

表2 石英二长岩、玄武岩中锆石的Hf同位素分析结果

Table 2 Zircon Hf isotopic data for quartz monzonite and basalt

测点号	Age (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM}	T_{DMc}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
石英二长岩											
1	280	0.037 074	0.000 429	0.001 154	0.000 014	0.282 132	0.000 020	-22.64	-16.70	1 583	2 354
2	281	0.038 734	0.000 140	0.001 201	0.000 004	0.282 202	0.000 024	-20.17	-14.24	1 487	2 198
3	279	0.028 828	0.000 247	0.000 881	0.000 009	0.282 196	0.000 019	-20.37	-14.39	1 482	2 208
4	280	0.054 428	0.000 439	0.001 617	0.000 015	0.282 285	0.000 023	-17.21	-11.34	1 385	2 017
5	280	0.041 198	0.000 270	0.001 215	0.000 008	0.282 253	0.000 020	-18.35	-12.41	1 415	2 084
6	281	0.046 922	0.000 353	0.001 371	0.000 009	0.282 312	0.000 018	-16.28	-10.37	1 339	1 955
7	289	0.044 059	0.001 810	0.001 303	0.000 054	0.282 245	0.000 022	-18.65	-12.54	1 431	2 100
8	280	0.048 764	0.000 347	0.001 487	0.000 015	0.282 311	0.000 020	-16.32	-10.42	1 345	1 960
9	280	0.052 770	0.000 749	0.001 535	0.000 026	0.282 213	0.000 024	-19.76	-13.91	1 484	2 177
10	280	0.048 744	0.000 135	0.001 414	0.000 005	0.282 288	0.000 022	-17.11	-11.21	1 374	2 009
11	283	0.038 939	0.000 132	0.001 153	0.000 002	0.282 290	0.000 023	-17.04	-11.03	1 361	1 999
12	285	0.041 294	0.000 628	0.001 190	0.000 022	0.282 207	0.000 025	-19.98	-13.92	1 479	2 183
13	282	0.058 001	0.000 598	0.001 646	0.000 021	0.282 328	0.000 024	-15.69	-9.79	1 325	1 920
14	289	0.046 676	0.000 511	0.001 329	0.000 010	0.282 297	0.000 025	-16.81	-10.74	1 359	1 984
15	286	0.056 501	0.001 133	0.001 579	0.000 032	0.282 239	0.000 025	-18.86	-12.88	1 450	2 117
16	281	0.059 493	0.000 144	0.001 677	0.000 008	0.282 401	0.000 022	-13.11	-7.27	1 223	1 760
17	283	0.034 540	0.000 511	0.000 937	0.000 016	0.282 261	0.000 021	-18.07	-12.03	1 394	2 062
18	286	0.039 795	0.000 275	0.001 110	0.000 005	0.282 197	0.000 024	-20.35	-14.27	1 491	2 207
玄武岩											
1	280	0.051 617	0.000 453	0.001 463	0.000 013	0.282 292	0.000 029	-16.96	-11.08	1 369	1 999
2	287	0.039 388	0.000 622	0.001 058	0.000 016	0.282 282	0.000 024	-17.34	-11.24	1 370	2 015
3	281	0.098 110	0.000 979	0.002 717	0.000 027	0.282 296	0.000 032	-16.84	-11.18	1 412	2 006
4	277	0.043 547	0.000 114	0.001 188	0.000 003	0.282 270	0.000 019	-17.77	-11.87	1 391	2 048
5	271	0.075 961	0.000 978	0.002 194	0.000 033	0.282 222	0.000 026	-19.45	-13.89	1 498	2 170
8	277	0.056 354	0.000 476	0.001 568	0.000 007	0.282 308	0.000 021	-16.42	-10.59	1 352	1 969
10	281	0.045 425	0.000 527	0.001 275	0.000 015	0.282 311	0.000 019	-16.32	-10.38	1 337	1 956
11	280	0.034 278	0.000 075	0.000 988	0.000 004	0.282 814	0.000 019	1.48	7.47	620	824
14	274	0.058 519	0.000 619	0.001 873	0.000 027	0.282 225	0.000 022	-19.34	-13.67	1 481	2 158
17	277	0.051 655	0.000 323	0.001 707	0.000 015	0.283 039	0.000 025	9.44	15.23	307	324

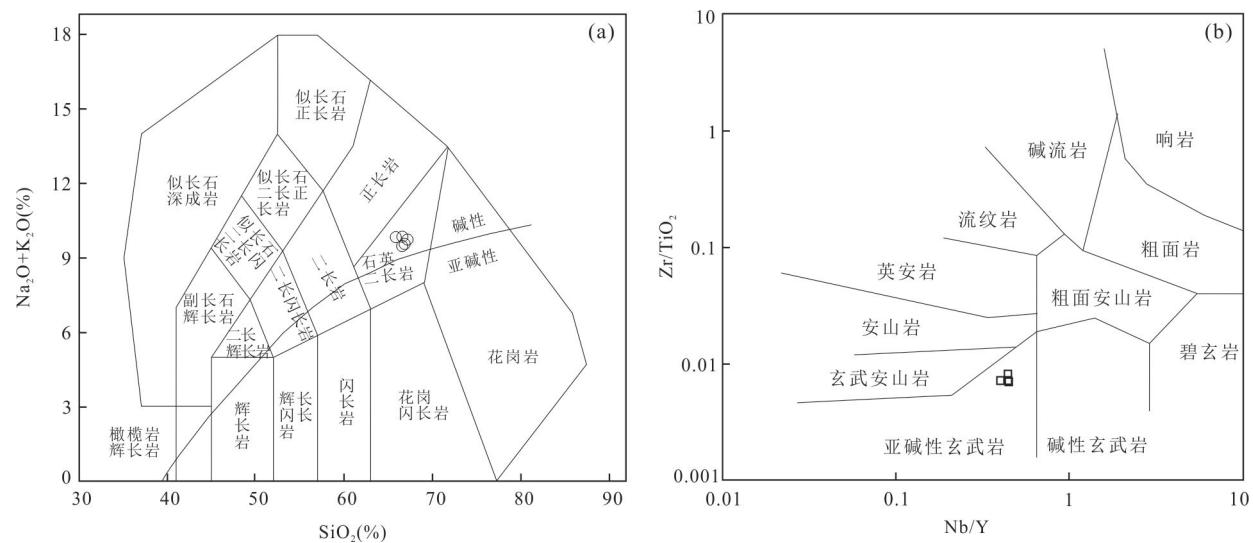
图 6 石英二长岩 TAS 图解(a, 据 Irvine and Baragar, 1971) 和玄武岩 Zr/TiO_2 -Nb/Y 图解(b, 据 Wilson, 1989)

Fig. 6 TAS(a, after Irvine and Baragar, 1971) and Zr/TiO_2 vs. Nb/Y (b, after Wilson, 1989) classification diagrams for quartz monzonite(a) and basalt(b)

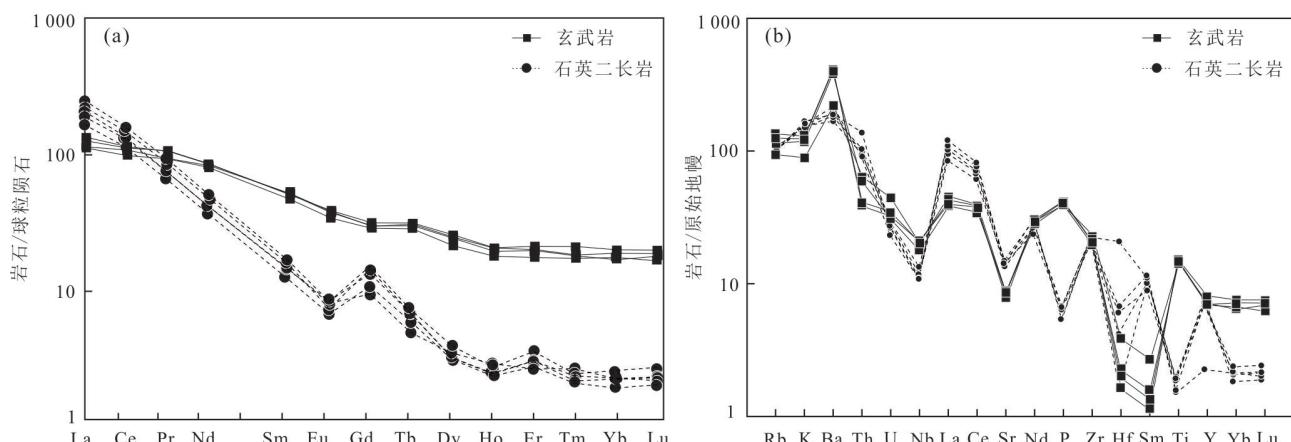


图 7 石英二长岩、玄武岩稀土元素配分模式图(a, 据 Boynton, 1984)和微量元素原始地幔标准化图解(b, 据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalization values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b, normalization values after Sun and McDonough, 1989) for quartz monzonite (a) and basalt (b)

表 3 石英二长岩、玄武岩的主量元素(%)、稀土微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果表Table 3 Major (%), rare earth and trace element ($\times 10^{-6}$) for quartz monzonite and basalt

样品号	P09-01	P09-03	P09-04	P09-05	P09-06	P13-02	P13-03	P13-04	P13-05
岩性	石英二长岩					玄武岩			
SiO_2	66.37	66.59	66.85	67.17	65.87	50.64	49.31	50.36	48.83
TiO_2	0.33	0.43	0.42	0.35	0.40	3.18	3.18	3.08	3.24
Al_2O_3	16.10	16.55	15.89	16.54	16.62	14.63	15.07	14.66	15.81
Fe_2O_3	2.77	1.46	1.71	1.37	1.95	9.33	6.65	6.76	6.71
P_2O_5	0.12	0.15	0.15	0.12	0.14	0.85	0.88	0.86	0.91
CaO	1.59	1.84	1.98	1.76	1.85	1.76	2.08	1.81	1.61
K_2O	5.15	4.75	4.72	4.99	4.93	2.68	3.66	3.54	3.92
MgO	0.62	0.81	0.77	0.68	0.8	4.07	5.02	4.68	5.14
MnO	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.12	0.11	0.12	0.086
Na_2O	4.67	4.72	4.82	4.76	4.9	4.48	2.94	3.45	2.92

续表3

样品号	P09-01	P09-03	P09-04	P09-05	P09-06	P13-02	P13-03	P13-04	P13-05
岩性	石英二长岩					玄武岩			
FeO	1.47	1.84	1.81	1.56	1.74	4.35	6.44	6.14	6.48
LOS	0.37	0.77	0.75	0.65	0.70	3.71	4.25	3.82	3.83
Total	99.64	100	99.99	100	99.98	99.8	99.59	99.28	99.48
Mg#	0.23	0.33	0.30	0.32	0.30	0.37	0.43	0.42	0.44
A/CNK	1.02	1.04	0.97	1.02	1.01	1.28	1.44	1.36	1.61
AR	3.23	3.11	3.31	3.17	3.26	2.55	2.04	2.44	2.01
Cr	0.0008	12.8	12.1	13.8	10.8	39.6	27.4	23.8	25.5
Ni	2.324	4.71	6.5	6.25	5.2	18.7	41.9	17.4	72.4
Co	3.354	4.28	5.6	3.93	3.97	38.3	42.5	40.4	45.7
Rb	68.237	69.9	67.2	66.9	66.6	59.8	78.7	72.1	85.7
Cs	2.949	3.14	2.9	2.72	2.2	1.55	1.26	1.16	1.40
Sr	323.45	294	319	304	308	181	180	183	164
Ba	1339.8	1228	1322	1551	1399	1527	2750	2645	2836
V	0.002	28.7	29.4	26.1	26.5	277	293	272	296
Sc	4.497	2.98	3.49	2.75	2.46	22.760 3	21.750 9	20.98	22.10
Nb	8.038	8.75	9.68	7.91	8.13	14.6	14.3	12.8	14.7
Ta	0.736	1.08	1.43	0.93	0.86	1.64	2.22	2.75	1.53
Zr	260.25	252	246	241	229	258	226	222	233
Hf	6.606	1.3	0.5	2.1	1.9	1.20	0.60	0.70	0.50
U	0.585	0.6	0.62	0.5	0.57	0.93	0.73	0.65	0.68
Th	12.055	8.46	9.08	7.93	8.58	5.42	3.47	5.02	3.28
La	66.896	72.676	85.126	59.8	77.342	31.26	26.86	26.41	29.62
Ce	125.365	129.558	150.264	111.596	140.327	69.75	65.81	60.47	68.21
Pr	12.16	12.145	14.726	10.867	13.728	10.09	8.96	8.89	10.16
Nd	36.32	36.513	43.294	32.586	41.365	40.35	39.37	38.11	40.47
Sm	4.654	4.603	5.27	4.005	4.979	1.2	0.6	0.7	0.5
Eu	1.067	1.097	1.093	0.913	0.983	2.31	2.33	2.1	2.38
Gd	4.358	5.848	6.532	4.886	6.244	6.59	6.56	6.33	6.94
Tb	0.447	0.593	0.626	0.527	0.632	1.2	1.23	1.14	1.26
Dy	2.267	2.113	2.511	2.063	2.113	6.71	6.81	5.93	7.05
Ho	0.431	0.372	0.411	0.360	0.376	1.21	1.27	1.12	1.28
Er	1.172	1.314	1.514	1.211	1.321	3.57	3.62	3.21	3.83
Tm	0.181	0.163	0.168	0.146	0.151	0.51	0.52	0.49	0.59
Yb	1.039	1.054	1.168	0.909	1.041	3.17	3.51	3.29	3.73
Lu	0.159	0.151	0.183	0.142	0.158	0.5	0.52	0.47	0.55
Y	10.429	10.929	11.449	9.622	10.264	32.99	32	31.48	35.96
Σ REE	290.7	256.5	268.2	312.9	230.0	185.4	175.66	165.5	184.6
Σ LREE	278.7	246.5	256.6	299.8	219.8	162.0	151.6	143.5	159.4
Σ HREE	12.04	10.06	11.61	13.11	10.24	23.44	24.03	21.96	25.22
LREE/ HREE	23.15	24.51	22.11	22.87	21.45	6.91	6.31	6.53	6.32
δ Eu	0.54	0.72	0.65	0.57	0.63	0.96	0.97	0.93	0.95

围较大(−13.89~15.23, 主要集中在−13.890~−10.398之间), Hf二阶段模式年龄整体较古老

(324~2 170 Ma, 主要在1 956~2 170 Ma之间, 仅有324 Ma、824 Ma两个年轻测点), 较大的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

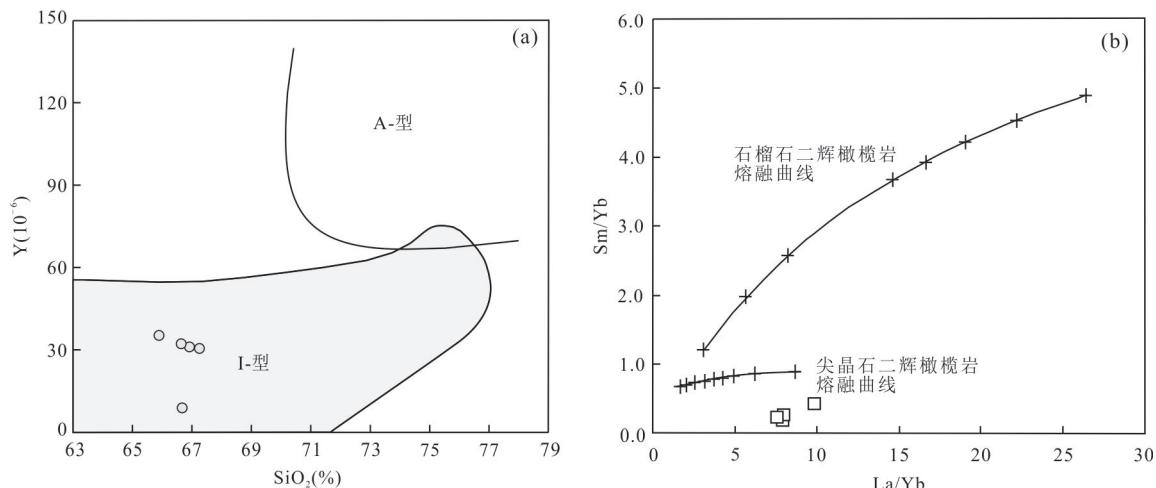


图 8 石英二长岩 I型-A 型花岗岩判别图解(a, 据 Collins *et al.*, 1982)和玄武岩 La/Yb-Sm/Yb 图解(b, 据 Xu *et al.*, 2005)分类图解
Fig. 8 I model vs. A model (a, after Collins *et al.*, 1982) and La/Yb vs. Sm/Yb (b, after Xu *et al.*, 2005) classification diagrams for quartz monzonite (a) and basalt (b)

推测是玄武岩幔源岩浆源区 Hf 同位素组成, 低 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值应为玄武岩幔源岩浆上升过程中引起部分熔融围岩的 Hf 同位素组成; Nb/U=15.70~21.62, 均值 19.15, 介于壳、幔之间, La/Yb-Sm/Yb 图解中样品全位于尖晶石二辉橄榄岩稳定区(图 8b), 表明基性端元岩浆可能起源于上地幔, 在上升过程中引起华北板块古老基底部分熔融且与生成岩浆发生混合作用, 最终的成岩岩浆中壳源比重大。

石英二长岩及玄武岩 SiO₂ 含量存在 50.64%~65.87% 范围内的明显间断, 具有双峰式岩浆岩特征, Ti 和 P 在石英二长岩中强烈亏损, 在玄武岩中相对富集, 相反的, Hf、Sm 在玄武岩中相对亏损, 在石英二长岩中相对富集, 具有明显的互补性, 表明二者可能形成于同源岩浆的分离结晶作用或是伸展环境下相同岩浆源区的部分熔融作用; 在 Harker 图解上, 石英二长岩及玄武岩 TiO₂、FeO、MgO 与 SiO₂ 整体呈明显的负相关, 局部变异趋势又截然不同(图 9), 表明二者并非同源岩浆演化形成, 但岩浆起源存在较为密切的联系; 研究区内玄武岩分布范围远不如石英二长岩广泛, 且锆石 U-Pb 定年也偏新, 石英二长岩的 Hf 同位素组成全部来自华北板块古老基底, 玄武岩的 Hf 同位素组成虽也主要来自华北板块古老基底, 但个别测点具有明显的幔源特征, 玄武岩中 FeO、MgO 等矿物随着 SiO₂ 降低而快速增高可能正是幔源岩浆加入所致; 因此, 本文认为东大山地区双峰式岩浆岩应形成于伸展环境下相同岩浆源区的部分熔融作用, 而非同源岩浆的分离结晶作用, 在部分熔融过程中, 富 Ti、P 的金红石、磷灰

石等矿物残留在岩浆源区, 富 Hf、Sm 的矿物可能优先进入熔体中, 石英二长岩岩浆形成于部分熔融早期, 不含幔源组分, 曼源岩浆继续加热残留有富含 Ti、P 等元素的金红石、磷灰石等矿物的岩浆源区, 并与形成的岩浆发生混合作用, 最终形成壳源比重较大的玄武岩岩浆。

4.4 构造背景

在微量元素 $w(\text{Y}+\text{Nb})-w(\text{Rb})$ 构造环境判别图上, 石英二长岩样品均落在火山弧花岗岩分布区靠近板内花岗岩一侧(图 10a); Th-Ta 协变判别图解中, 玄武岩样品部分投在活动大陆边缘玄武岩区域内, 部分投在活动大陆边缘弧玄武岩与板内玄武岩之间, 皆位于过渡性玄武岩范围内(图 10b), 与研究区西部内蒙古武川县西北地区、内蒙古温都尔庙南一铁沙盖地区、内蒙古镶黄旗哈达庙地区及东部内蒙古赤峰市刘家营子地区发现的同时期活动大陆边缘 I 型花岗岩, 西部达茂地区、商都县西井子镇, 东部赤峰市朝阳地、翁牛特旗, 北部苏尼特左旗、锡林浩特、林西等地出露的同时期火山岩(吕志成等, 2002; 袁桂邦和王惠初, 2006; 陈井胜, 2008; 郝百武和蒋杰, 2010; 程天赦等, 2013; 王挽琼等, 2013; 曹代勇等, 2014; 刘军等, 2014; 梅可辰等, 2015; 董晓杰等, 2016; 关庆彬等, 2016; 彭斌等, 2016; 童英等, 2016; 张晓飞等, 2016; 王月古, 2018)形成背景相似; 石英二长岩锆石饱和温度范围介于低温—高温花岗岩之间, 低温花岗岩更可能反映俯冲有关的构造环境, 高温花岗岩可能反映的是软流圈上涌环境(吴福元等, 2007a), 可能反映了古亚洲

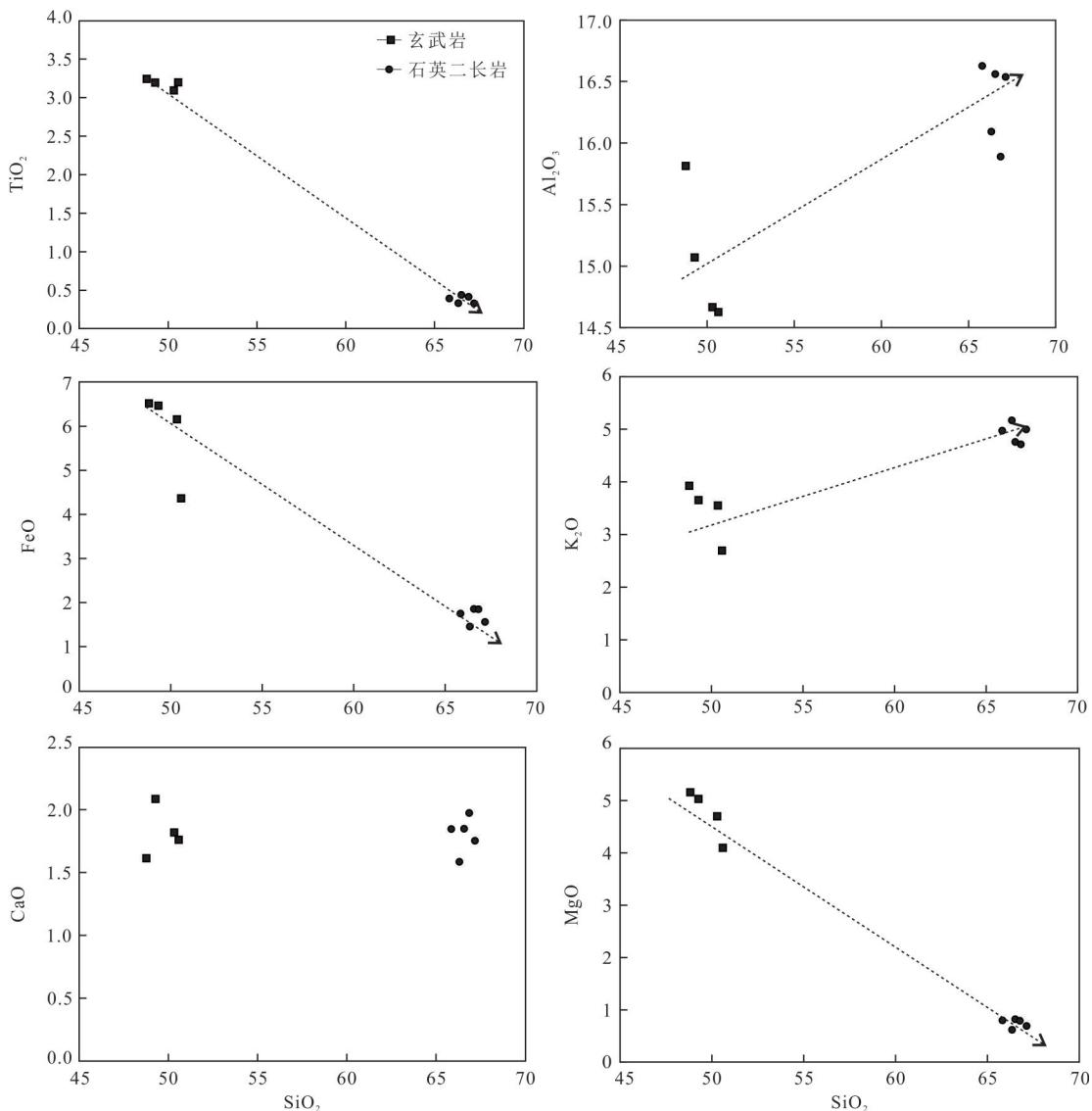


图9 东大山地区双峰式岩浆岩Harker图解
Fig. 9 Harker diagram of Bimodal magmatites in Duolun area

洋俯冲作用下,华北板块局部处于伸展环境。

研究区位于中亚造山带与华北板块的交接带上北缘,其早二叠世期间的构造属性至今仍没有统一的认识,目前主要存在两种观点:一种观点认为其当时应处于造山后的伸展环境(邵济安等,2014;徐备等,2014,2018),另一种观点则认为其当时仍处于古亚洲洋的俯冲作用下,属于活动大陆边缘环境(李锦轶等,2007;王挽琼等,2013;彭斌等,2016;董晓杰等,2016;张晓飞等,2016,2018a, 2018b;李世超等,2020)。本次研究结果表明,东大山地区早二叠世石英二长岩、玄武岩空间上紧密共生,地球化学、Hf同位素组成等较为特殊,既含有伸展环境岩浆岩特征,又具有岛弧岩浆岩特性,形成背景较为复杂。观点一与东大山地区石英二长岩、玄武岩

的双峰式特征较为吻合,在此前提下,石英二长岩的岛弧特征只能继承自岩浆源区,即研究区在早二叠世之前曾处于岛弧环境,应是造山带新生陆壳的组成部分,然而本次分析测试结果显示,东大山地区早二叠世石英二长岩Hf同位素组成全部来自华北板块古老基底,并不含有新生陆壳Hf同位素组成,因此研究区早二叠世期间不太可能处于造山后的伸展环境。前人研究成果显示与俯冲有关的活动大陆边缘、弧后盆地等地区也是可以存在伸展环境的(张晓飞等,2018a, 2018b);东大山地区石英二长岩锆石饱和温度也正好反映了一种俯冲作用下的伸展背景。夏炎等(2016)、朱日祥和徐义刚(2019)对古太平洋板块向华北板块之下的俯冲演化过程与我国东部沿海岩浆作用的研究进展对合理研究、

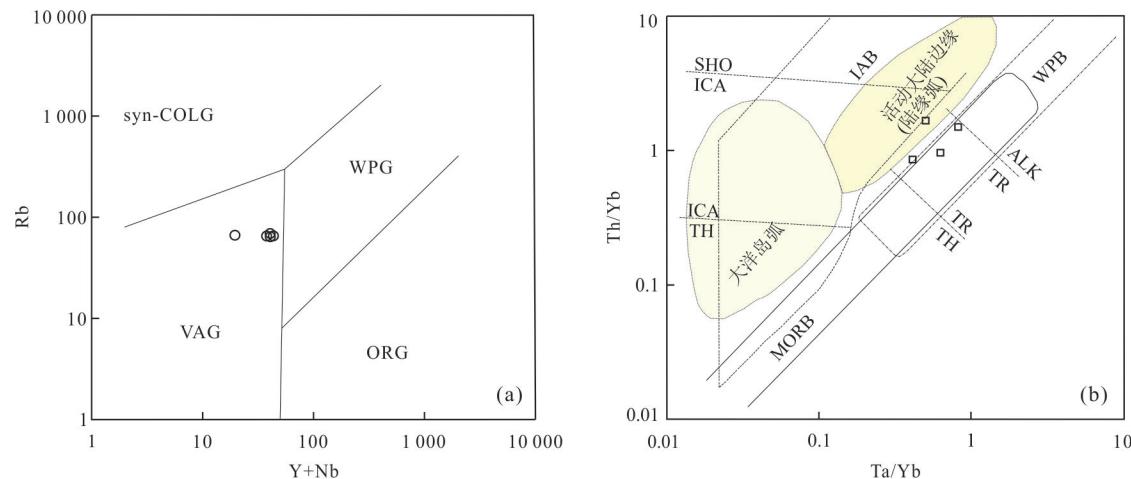


图 10 石英二长岩微量元素 $w(Y+Nb)$ - $w(Rb)$ 构造环境判别图(a, 据 Pearce *et al.*, 1984)及玄武岩 Th-Ta 协变判别图解(b, 据 Pearce *et al.*, 1982)

Fig. 10 $w(Y+Nb)$ vs. $w(Rb)$ (a, after Pearce *et al.*, 1984) and Th vs. Ta (b, after Pearce *et al.*, 1982) classification diagrams for quartz monzonite (a) and basalt (b)

ORG. 大洋中脊花岗岩; WPG. 板内花岗岩; VAG. 火山弧花岗岩; Syn-COLG. 同碰撞花岗岩; MORB. 洋中脊玄武岩; WPB. 板内玄武岩; IAB. 岛弧玄武岩; SHO. 橄榄玄武岩; TH. 拉斑玄武岩; TR. 过渡性玄武岩; ALK. 碱性火山弧玄武岩; ICA. 钙碱性玄武岩

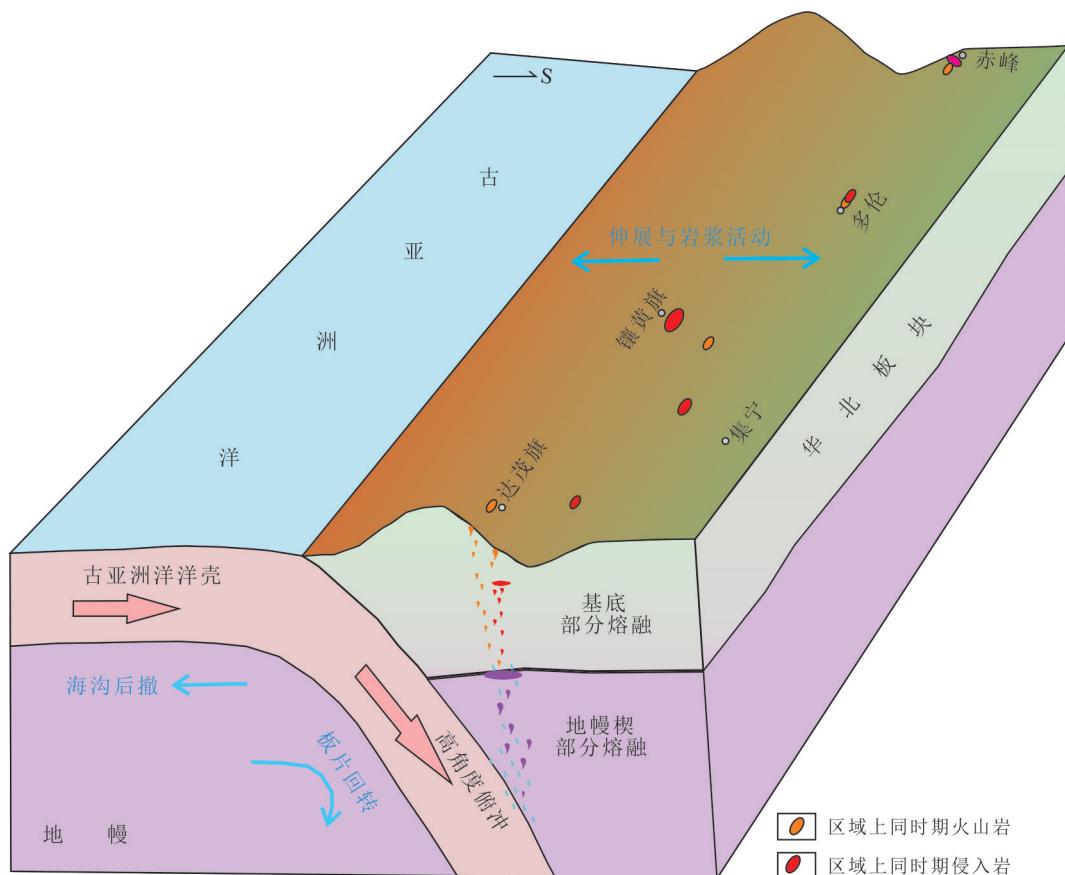


图 11 东大山地区双峰式岩浆岩形成模型

Fig. 11 Aschematic diagram showing the mechanism in formation of Bimodal magmatites in Duolun area
据朱日祥和徐日刚(2019)改

解释东大山地区双峰式岩浆岩的岩石成因及大地构造背景具有很好的启示作用。古亚洲洋向华北板块俯冲过

程中,板片脱水引起地幔楔部分熔融,随着俯冲角度的逐渐增大、俯冲板块的回撤,俯冲带上部应力环境逐渐转变为张性,华北板块北缘处于伸展环境,板片脱水形成的流体、地幔楔部分熔融形成的岩浆不断向上运移、汇聚至华北板块之下引起古老基底部分熔融,石英二长岩岩浆形成于部分熔融早期,不含幔源组分;幔源岩浆继续加热残留有富含Ti、P等元素的金红石、磷灰石等矿物的岩浆源区,并与形成的岩浆发生混合作用,最终形成壳源比重较大的玄武岩岩浆(图11)。

5 结论

(1) 镓石U-Pb测年结果表明,东大山地区石英二长岩、玄武岩的镓石U-Pb年龄分别为 283 ± 1.6 Ma、 280 ± 2.9 Ma,形成时代为早二叠世;

(2) 全岩地球化学、镓石Hf同位素特征表明,东大山地区石英二长岩、玄武岩具有双峰式岩浆岩特征,可能是板块俯冲、后撤引起的伸展背景下,古亚洲洋俯冲板片脱水引起上地幔部分熔融形成的幔源岩浆向上运移、汇聚至华北板块之下引起古老基底部分熔融的产物;石英二长岩岩浆形成于部分熔融作用早期,不含幔源组分;玄武岩岩浆是幔源岩浆持续加热残留有磷灰石、金红石等矿物的石英二长岩岩浆源区,并与形成的岩浆发生混合作用形成的。

(3) 早二叠世期间,研究区仍遭受到古亚洲洋的持续俯冲作用,华北板块北缘广大地区仍处于活动大陆边缘环境。

References

- Boynton, W. V., 1984. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., ed., Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 63–144.
- Cao, D. Y., Zhao, F. Liu, D., et al., 2014. Geochemical Characteristics and Tectonic Implications of the Early Permian Volcanic Rocks from Ongniud Banner, Inner Mongolia. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 29(3): 38–43 (in Chinese with English abstract).
- Chu, H., Wang, H. C., Wei, C. J., et al., 2012. The Metamorphic Evolution History of High Pressure Granulites in Chengde Area, Northern Margin of North China: Zircon Chronology and Geochemical Evidence. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(6): 977–987 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, J. S., 2018. Petrogenesis of the Late Paleozoic to Early Mesozoic Granitic from the Chifeng Region and Their Tectonic Implication(Dissertation). Jilin University, Changchun, 151–155 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, T. S., Yang, W. J., Wang, D. H., 2013. Zircon U-Pb Age of the Spilite-Keratophyre Sequence of the Dashizhai Formation in Maodeng of Xilinhaote Inner Mongolia and Its Geological Significance. *Geoscience*, 27(3): 526–535 (in Chinese with English abstract).
- Collins, W. J., Beams, S. D., White, A. J. R., et al., 1982. Nature and Origin of A-Type Granites with Particular Reference to Southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189–200. <https://doi.org/10.1007/bf00374895>
- Cui, Y. L., Qu, H. J., et al., 2019. First Identification of ~2.61 Ga Amphibolite in Jiefangyingzi Area on the Northern Margin of the North China Craton. *Geology in China*, 46(2): 436–437 (in Chinese).
- Dong, X. J., Wang, W. Q., Sha, Q., et al., 2016. Suzy Volcanic Rocks in the Northern Margin of the North China Craton and Its Formation Mechanism. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 2765–2779 (in Chinese with English abstract).
- Guan, Q. B., Liu, Z. H., Bai, X. H., et al., 2016. Age and Tectonic Setting of Volcanic Rocks of the Dashizhai Formation from Xinkaiba, Balinyouqi Area, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 32(7): 2029–2040 (in Chinese with English abstract).
- Hao, B. W., Jiang, J., 2010. Chronology, Geochemistry of the Hadamiao Complex Related to Gold Deposits in Xianghuang Banner, Inner Mongolia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 750–762 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
- Li, J. Y., Gao, L. M., Sun G. H., et al., 2007. Shuangjingzi Middle Triassic Syn-Collisional Crust-Derived Granite in

- the East Inner Mongolia and Its Constraint on the Timing of Collision between Siberian and Sino-Korean Paleo-Plates. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3):566–578(in Chinese with English abstract).
- Li, S. C., Wang, H. T., Li, G., et al., 2020. Northward Plate Subduction Process of the Paleo-Asian Ocean in the Middle Part of the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Adakites. *Acta Petrologica Sinica*, 36(8): 2521–2536. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2020.08.14>
- Liu, J., Wu, G., Liu, T. G., et al., 2014. SHRIMP Zircon U-Pb Dating, Geochemistry, Sr-Nd Isotope Analysis of the Late Paleozoic Intermediate-Acidic Intrusive Rocks in the Hadamiao ARea, Xianghuang Banner, Inner Mongolia and Its Geological Significances. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (1) :96–104(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. J., Li, W. M., Feng, Z. Q., et al., 2017. A Review of the Paleozoic Tectonics in the Eastern Part of Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 43(4): 123–148. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.03.013>
- Liu, Y. J., Feng, Z. Q., et al., 2019. Ophiolite in the Eastern Central Asian Orogenic Belt, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 35(10): 3017–3047. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2019.10.05>
- Lü, Z. C., Hao, L. B., Duan, G. Z., et al., 2002. Lithoge-chemical Characteristics and Tectonic Implications of Two Series of Volcanic Rocks from Early Permian Dashizhai Formation in the south section of Da Hinggan Mountains. *Geochimica*, 31(4):339–345. <https://doi.org/10.19700/j.0379-1726.2002.04.005>
- Mei, K. C., Li, Q. G., Wang, Z. Q., et al., 2015. SHRIMP Zircon U-Pb Age, Geochemistry and Tectonic Significance of the Dashizhai Formation Rhyolites in Sunid Left Banner, Middle Part of Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 34(12): 2182–2193(in Chinese with English abstract).
- Peng, B., Wang, G. Q., Liu, L., et al., 2016. Recognition of the Early Permian Volcanic Rocks and Its Geological Significance in Chifeng Region of Inner Mongolia. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(6):1330–1339(in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., 1982. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. In: Thorpe, R. S., ed., Andesites. Wiley, Chichester, 525–548.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Shang, Q. H. 2004. Occurrences of Permian Radio Larians in Central and Eastern Inner Mongolia and Their Geological Significance to the Northern China Orogen. *Chinese Science Bulletin*, 49(24):2574–2578(in Chinese).
- Shao, J. A., Tang, K. D., He, G. Q., 2014. Early Permian Tectono - Palaeo Geographic Reconstruction of Inner Mongolia, China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7):1858–1866(in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tong, Y., Hong, D. W., Wang T., et al., 2016. Spatial and Temporal Distribution of Granitoids in the Middle Segment of the Sino - Mongolian Border and Its Tectonic and Metallogenetic Implications. *Acta Geoscientifica Sinica*, 31(3): 395–412(in Chinese with English abstract).
- Wang, W. Q., Xu, Z. Y., Liu, Z. H., et al., 2013. Early Middle Permian Tectonic Evolution of the Central Northern Margin of the North China Craton: Constraints from Zircon U-Pb Ages and Geochemistry of the Granitoids. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9):2988–3000 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Fan, Z. Y., 1997. Discovery of Permian Radio-larians in Ophiolite Belt on Northern Side of Xarmoron River, Nei Monggol and Its Geological Significance. *Acta Palaeontologica Sinica*, 36(1):58–61 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. G., 2018. The Tectonic Significance of the Early Permian Volcanic Rocks in the North Margin of North China Block: A Case Study in Siziwang Banner Area (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 1–30(in Chinese with English abstract).
- Wilson, M., 1989. Igneous Petrogenesis. Unwin Hyman, London, 1–466.
- Wu, F. Y., Zhao, G. C., Sun, D. Y., et al., 2007. The Hulan Group: Its Role in the Evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(3/4): 542–556. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.01.003>
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007a. Discussions on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (6) :1220–1233(in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007b. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2) :186–208(in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Ge, W. C., et al., 2011. Geochro-

- nology of the Phanerozoic Granitoids in Northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1–30. https://doi.org/10.1016/j.jseae.2010.11.014
- Xia, Y., Liu, L and Xu, X. S. 2016. Late Mesozoic A-Type Granitoids in SE China and Paleo-Pacific Plate Subduction and Slab Rollback. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(6):1110–1116(in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Hao, J., et al., 2003. Accretion Leading to Collision and the Permian Solonker Suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22(6): 1069.
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Huang, B. C., et al., 2009. End Permian to Mid-Triassic termination of the Accretionary Processes of the Southern Altaids: Implications for the Geodynamic Evolution, Phanerozoic Continental Growth, and Metallogeny of Central Asia. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1189–1217.
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Sun, S., et al., 2015. A Tale of Amalgamation of Three Permo Triassic Collage Systems in Central Asia: Oroclines, Sutures, and Terminal Accretion. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43: 477–507.
- Xu, Y. G., Ma, J. L., Frey, F. A., et al., 2005. Role of Lithosphere-Asthenosphere Interaction in the Genesis of Quaternary Alkali and Tholeiitic Basalts from Datong, Western North China Craton. *Chemical Geology*, 224(4): 247–271.
- Xu, B., Zhao, P., Bao, Q. Z., et al., 2014. Preliminary study on the Pre-Mesozoic tectonic unit division of the Xing-Meng Orogenic Belt(XMOB). *Acta Petrologica Sinica*, 30(7):1842–1851(in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Wang, Z. W., Zhang, L. Y., et al., 2018. The Xing-Meng Intra Continent Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 34(10):2820–2838(in Chinese with English abstract).
- Yuan, G. B., Wang, H. C., 2006. Magmatic Activity and Its Tectonic Implications during the Early Permian in the Northwest Ward of Wuchuan, Inner Mongolia. *Geological Survey and Research*, 29(4):303–310(in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. F., Liu, J. L., Feng, J. L., et al., 2016. Geochronological and Geochemical Features of Volcanic Rocks of Dashizhai Formation in Ural Sutai of Xilin Hot, Inner Mongolia, and Their Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 35(5):767–774(in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. F., Zhou, Y., Liu, J. L., et al., 2018a. Geochro-nology and Geochemistry for Volcanic Rocks of Dashizhai Formation and Its Geological Significance in XiUjimqin Banner, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 34(6): 1775–1791(in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. F., Zhou, Y., Cao, J., et al., 2018b. Geochronological and Geochemical Features of Bimodal Intrusive Rocks in the Hanwula Area Xiwu Banner, Inner Mongolia: Constraints on Closure of the Paleo-Asian Ocean. *Acta Geologica Sinica*, 92(4):665–686 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Xu, Y. G., 2019. The Subduction of the West Pacific Plate and the Destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 49(9):1346–1356 (in Chinese).

附中文参考文献

- 曹代勇, 赵发, 刘登, 等, 2014. 内蒙古翁牛特旗地区早二叠世火山岩地球化学特征及其构造意义. 湖南科技大学学报, 29(3):38–43.
- 初航, 王慧初, 魏春景, 等, 2012. 华北北缘承德地区高压麻粒岩的变质演化历史. 地球学报, 33(6): 977–987.
- 陈井胜, 2008. 赤峰地区晚古生代—早中生代花岗岩成因及其构造意义(博士学位论文). 长春: 吉林大学, 151–155.
- 程天放, 杨文静, 王登红, 2013. 内蒙古锡林浩特毛登牧场大石寨组细碧一角斑岩系地球化学特征、锆石U-Pb年龄及地质意义. 现代地质, 27(3):526–535.
- 崔玉良, 渠洪杰, 陈英富, 等, 2019. 华北板块北缘解放营子地区发现~2.61 Ga斜长角闪岩. 中国地质, 46(2):436–437.
- 董晓杰, 王挽琼, 沙茜, 等, 2016. 华北克拉通北缘中段二叠纪苏吉火山岩及其形成机制. 岩石学报, 32(9):2765–2779.
- 关庆彬, 刘正宏, 白新会, 等, 2016. 内蒙古巴林右旗新开坝地区大石寨组火山岩形成时代及构造背景. 岩石学报, 32(7):2029–2040.
- 郝百武, 蒋杰, 2010. 内蒙古镶黄旗哈达庙金矿杂岩体年代学、地球化学及其形成机制. 岩石矿物学杂志, 29(6): 750–762.
- 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.
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等, 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. 岩石学报, 23(3):566–578.
- 李世超, 王洪涛, 李刚, 等, 2020. 中亚造山带中段古亚洲洋北向平板俯冲过程:来自埃达克岩的证据. 岩石学报, 36(8): 2521–2536.
- 刘军, 武广, 刘铁刚, 等, 2014. 内蒙古镶黄旗哈达庙地区晚古生代中酸性侵入岩的年代学、地球化学、Sr-Nd同位素组成及其地质意义. 岩石学报, 30(1):96–104.

- 刘永江, 冯志强, 蒋立伟, 等, 2019. 中国东北地区蛇绿岩. 岩石学报, 35(10):3018—3034.
- 吕志成, 郝立波, 段国正, 等, 2002. 大兴安岭南段早二叠世两类火山岩岩石地球化学特征及其构造意义. 地球化学, 31(4):339—345.
- 梅可辰, 李秋根, 王宗起, 等, 2015. 内蒙古中部苏尼特左旗大石寨组流纹岩 SHRIMP 钾石 U-Pb、地球化学特征及其构造意义. 地质通报, 34(12):2182—2193.
- 彭斌, 王国祺, 刘乐, 等, 2016. 内蒙古赤峰地区二叠纪火山岩的发现及其地质意义. 矿物岩石地球化学通报, 35(6): 1330—1339.
- 尚庆华, 2004. 北方造山带内蒙古中、东部地区二叠纪放射虫的发现及意义. 科学通报, 49(24): 2574—2578.
- 邵济安, 唐克东, 何国琦, 2014. 内蒙古早二叠世构造古地理的再造. 岩石学报, 30(7):1858—1866.
- 童英, 洪大卫, 王涛, 等, 2016. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义及构造和找矿. 地球学报, 31(3): 395—412.
- 王挽琼, 徐仲元, 刘正宏, 等, 2013. 华北板块北缘中段早中二叠世的构造属性: 来自花岗岩类锆石 U-Pb 年代学及地球化学的制约. 岩石学报, 29(9):2988—3000.
- 王玉净, 樊志勇, 1997. 内蒙古西拉木伦河北部蛇绿岩带中二叠纪放射虫的发现及其地质意义. 古生物学报, 36(1): 58—61.
- 王月古, 2018. 华北板块北缘早二叠世火山岩的构造意义: 以四子王旗地区为例. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1—30.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等, 2007a. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6):1220—1233.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007b. Lu-Hf 同位素体系及其应用. 岩石学报, 23(2):186—208.
- 夏炎, 刘磊, 徐夕生, 2016. 中国东南部中生代 A 型花岗岩类与太平洋板块俯冲—后撤. 矿物岩石地球化学通报, 35(6): 1110—1116.
- 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 等, 2014. 中亚造山带前中生代构造单元划分初探. 岩石学报, 30(7):1842—1851.
- 徐备, 王志伟, 张立杨, 等, 2018. 中亚陆内造山带. 岩石学报, 34(10):2820—2838.
- 袁桂邦, 王惠初, 2006. 内蒙古武川西北部早二叠世岩浆活动及其构造意义. 地质调查与研究, 29(4):303—309.
- 张晓飞, 刘俊来, 冯俊岭, 等, 2016. 内蒙古锡林浩特乌拉苏太大石寨组火山岩年代学、地球化学特征及其地质意义. 地质通报, 35(5):767—774.
- 张晓飞, 周毅, 刘俊来, 等, 2018a. 内蒙古西乌旗大石寨组火山岩年代学和地球化学特征及地质意义. 岩石学报, 34(6): 1775—1791.
- 张晓飞, 周毅, 曹军, 等, 2018b. 内蒙古西乌旗罕乌拉地区双峰式侵入体年代学、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约. 地质学报, 92(4):665—686.
- 朱日祥, 徐义刚, 2019. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 49(9):1346—1356.