

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.104>



中条山中生代镁铁质侵入岩年代学与地球化学:对华北克拉通南部岩石圈地幔性质的制约

刘 洁¹, 袁玲玲^{1,2*}, 杨智荔^{2,3}

1. 中南大学地球科学与信息物理学院有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083

2. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要: 镁铁质岩石作为幔源岩浆产物, 其成因研究有助于探讨华北克拉通深部地幔性质及其演化过程. 对中条山地区镁铁质侵入岩开展了系统的锆石 U-Pb 年代学、全岩主、微量元素、全岩 Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素研究, 揭示了晚三叠世 (217 ± 2 Ma) 和早白垩世 (121 ± 2 Ma) 两期镁铁质岩浆活动. 晚三叠世镁铁质侵入岩 SiO_2 含量低至中等 ($46.03\% \sim 53.87\%$), MgO ($14.37\% \sim 18.61\%$)、Ni ($282 \times 10^{-6} \sim 433 \times 10^{-6}$)、Cr ($619 \times 10^{-6} \sim 1\,847 \times 10^{-6}$) 异常富集, 亲岩浆元素丰度较低, 上凸型稀土配分模式发育显著, 指示岩体为堆晶成因. 大量原生角闪石的发育表明晚三叠世杂岩的母岩浆高度富水, 所有样品具有近平行的微量元素配分模式指示其轻度分异的 LILE-HFSE (大离子亲石元素—高场强元素) 组成反映地幔源区固有属性, 母岩浆可能起源于经大洋板片沉积物熔/流体交代的地幔楔部分熔融. 早白垩世镁铁质侵入岩 SiO_2 含量介于 $49.23\% \sim 54.99\%$, MgO 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量分别为 $4.29\% \sim 7.17\%$ 和 $9.70\% \sim 14.79\%$, 大离子亲石元素 (Rb、Ba、K、Pb) 和轻稀土元素富集, 高场强元素 (Nb、Ta、Zr、Hf、Ti) 和重稀土元素亏损, 可能为经俯冲陆壳衍生熔体交代的岩石圈地幔部分熔融形成. 晚三叠世杂岩可能响应于扬子板块与华北克拉通碰撞引起的造山后岩石圈拆沉, 早白垩世侵入岩则可能与古太平洋板块西向俯冲后回撤所引起的弧后岩石圈伸展有关. 此外, 二者均具有相对典型克拉通富集地幔亏损的全岩 Nd ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -18.56 \sim -12.64$) 和锆石 Hf ($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -20.2 \sim +10.4$), 指示华北克拉通中南部岩石圈地幔性质自晚三叠世以来发生了显著改变, 早白垩世克拉通破坏可能延及华北中部.

关键词: 华北克拉通; 中条山; 镁铁质侵入岩; 岩石成因; 岩石圈地幔演化; 岩石学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2022)04-1271-24

收稿日期: 2021-03-31

Geochronology and Geochemistry of Mesozoic Mafic Intrusive Rocks in Zhongtiao Mountain Area: Characterizing Lithospheric Mantle of Southern North China Craton

Liu Jie¹, Yuan Lingling^{1,2*}, Yang Zhili^{2,3}

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (No. 41903030).

作者简介: 刘洁 (1996—), 女, 硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业. ORCID: 0000-0002-4045-9508. E-mail: liujie11222@163.com

* **通讯作者:** 袁玲玲, ORCID: 0000-0002-5907-857X. E-mail: yuanll@126.com

引用格式: 刘洁, 袁玲玲, 杨智荔, 2022. 中条山中生代镁铁质侵入岩年代学与地球化学: 对华北克拉通南部岩石圈地幔性质的制约. 地球科学, 47(4): 1271—1294.

Citation: Liu Jie, Yuan Lingling, Yang Zhili, 2022. Geochronology and Geochemistry of Mesozoic Mafic Intrusive Rocks in Zhongtiao Mountain Area: Characterizing Lithospheric Mantle of Southern North China Craton. *Earth Science*, 47(04): 1271—1294.

1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China
2. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The mafic rocks originating from deep earth are probes for lithospheric mantle evolution. In this paper, it presents a synthesis study of zircon U-Pb chronology, whole-rock elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry, and zircon Hf isotope of the mafic intrusive rocks in the Zhongtiao Mountain area. Two periods of magmatism during the Late Triassic (217 ± 2 Ma) and the Early Cretaceous (121 ± 2 Ma) are unraveled. The Late Triassic samples are characterized by low to intermediate SiO_2 contents (46.03%–53.87%), high MgO (14.37%–18.61%), Ni (282×10^{-6} – 433×10^{-6}) and Cr (619×10^{-6} – $1\ 847 \times 10^{-6}$) concentrations, low magmatophile element abundances, and convex rare earth element distribution patterns, indicating a cumulate origin. The existence of a large number of original amphiboles indicates that the parental magma is highly water-rich. All samples have nearly parallel trace element distribution patterns, which implies that their mild LILE-HFSE (large ion lithophile element - high field strength element) differentiation reflects the inherent attributes of mantle source region, and their parental magma probably originated from partial melting of the mantle wedge metasomatized by subducted sediment melt/fluid. The SiO_2 content of Early Cretaceous mafic intrusive rocks lies between 49.23%–54.99%, while the contents of MgO and Fe_2O_3^T are 4.29%–7.17% and 9.70%–14.79%, respectively. Meanwhile, these rocks are enriched in LILEs and light rare earth elements (LREEs), and depleted in HFSEs and heavy rare earth elements (HREEs). Their formation is ascribed to partial melting of lithospheric mantle metasomatized by subducted continental crust-derived melt. The Late Triassic complex may be related to post-orogenic oceanic slab breakoff caused by collision between the Yangtze plate and the North China craton (NCC), while the Early Cretaceous intrusive rocks may be linked with back arc lithospheric extension triggered by the retreat of Paleo-Pacific plate during its westward subduction. In addition, the relative depletion of whole-rock Nd ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -18.56$ to -12.64) and zircon Hf ($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -20.2$ to $+10.4$) isotopic compositions in samples compared with that of typical craton lithospheric mantle indicates that the lithospheric mantle nature of the central and southern part of the NCC have changed significantly since the Late Triassic, and the Early Cretaceous craton destruction extends to the central part of the NCC.

Key words: North China craton; Zhongtiao Mountain; mafic intrusive rock; petrogenesis; lithospheric mantle evolution; petrology.

0 引言

大量深源岩石的地球化学研究(汤艳杰等, 2021)及地震学观测(Zheng *et al.*, 2009)表明, 华北克拉通在中生代经历了明显的岩石圈减薄, 其东部陆块从原来的~200 km 减薄至 60~80 km. 同时, 华北克拉通东部古生代金伯利岩和新生代玄武岩中的地幔橄榄岩、辉石岩包体研究表明, 中生代华北克拉通东部岩石圈地幔性质发生改变, 冷的古老难熔的岩石圈地幔被热的新生饱满岩石圈地幔所替代, 原有的稳定性荡然无存(Griffin *et al.*, 1998). 华北克拉通在中生代发生破坏已成为不争的事实, 然而关于破坏的时间、动力学机制以及空间范围仍然存在不少争议. 华北克拉通中生代岩浆岩的大量年代学研究表明克拉通破坏的峰期应当为早白垩世~125 Ma(Zhang *et al.*, 2014), 但破坏起止时间未有定论, 可能始于晚石炭世—晚三叠世, 并持续到晚白垩世末期—新生代早期(Xu *et al.*, 2009). 关于

其破坏的动力学机制, 前人提出了多个模型(汤艳杰等, 2021): (1) 晚三叠世华北陆块和扬子板块碰撞后形成的加厚榴辉岩化下地壳连同岩石圈地幔拆沉进入软流圈(高山等, 2003; Wu *et al.*, 2005; Gao *et al.*, 2009); (2) 下伏软流圈物质自下而上侵蚀古老岩石圈地幔(Griffin *et al.*, 1998; 郑建平等, 2006); (3) 古太平洋板块自西向东俯冲诱发克拉通破坏(郑永飞和吴福元, 2009; Zheng *et al.*, 2018); (4) 古老岩石圈地幔橄榄岩与熔体的相互作用导致克拉通破坏(张宏福等, 2004)等. 华北克拉通东部发育的大规模岩浆活动指示中生代华北克拉通岩石圈地幔化学性质已发生改变, 然而西部陆块是否仍保留原有性质, 以及克拉通破坏的具体范围是否以大兴安岭—太行山—武陵山重力梯度带为界, 目前仍存在不同意见(Zheng *et al.*, 2018). 在地幔包体相对缺乏的情况下, 镁铁质岩石作为幔源岩浆产物, 其成因研究对进一步探讨华北克拉通深部地幔性质及其演化过程具有重要意义(裴福萍等, 2004;

Zhao *et al.*, 2015).

本研究拟以中条山地区镁铁质侵入岩为研究对象,通过SIMS锆石U-Pb测年精确厘定其形成时代,借助元素地球化学、Sr-Nd同位素及锆石Hf同位素示踪其源区性质,揭示岩石成因,为完善华北克拉通中生代岩浆作用的时空框架以及探索华北克拉通破坏的地球动力学机制提供线索。

1 区域地质背景与岩相学特征

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一,由东部陆块、西部陆块以及中部造山带3个部分组成(Zhao *et al.*, 2000).华北克拉通记录了多次显生宙俯冲—碰撞事件,包括晚二叠世北缘古亚洲洋俯冲形成中亚造山带(郑建平和戴宏坤, 2018),晚三叠世南部扬子板块俯冲形成秦岭—大别—苏鲁造山带(Li *et al.*, 1993),以及侏罗纪时期古太平洋板块的西向俯冲(Kusky *et al.*, 2014).华北克拉通中生代镁铁质岩浆活动在晚三叠世、侏罗纪和白垩纪均

有出现(郑永飞等, 2018).晚三叠世岩浆活动主要出现在辽东半岛和苏鲁造山带附近(Yang *et al.*, 2007a, 2007b),侏罗纪岩浆活动目前仅有辽东半岛的煌斑岩被报道(姜耀辉等, 2005),白垩纪岩浆活动则在克拉通东部陆块广泛分布,并在晚白垩世有向西迁移的趋势(图1)(闫峻等, 2003; 王微等, 2006; Guo *et al.*, 2014).

本文研究区域中条山地区位于华北克拉通中部造山带南缘,靠近秦岭—大别造山带北缘(图2a).该区分布大量的前寒武纪基性岩墙,但中生代的基性岩浆活动鲜有报道(赵斌等, 2012; 刘玄等, 2015).本次研究的样品采自闻喜—垣曲—绛县一带,样品露头较好,具体采样位置如图2b所示。

野外观察表明,由角闪石岩和少量角闪辉长岩组成的晚三叠世基性岩侵入晚太古代双峰式火山岩中,岩体局部可观察到围岩顶垂体(图3a).其代表性岩石类型——角闪石岩主要由95%以上的角闪石和少量基性斜长石组成.角闪石为浅黄绿色,

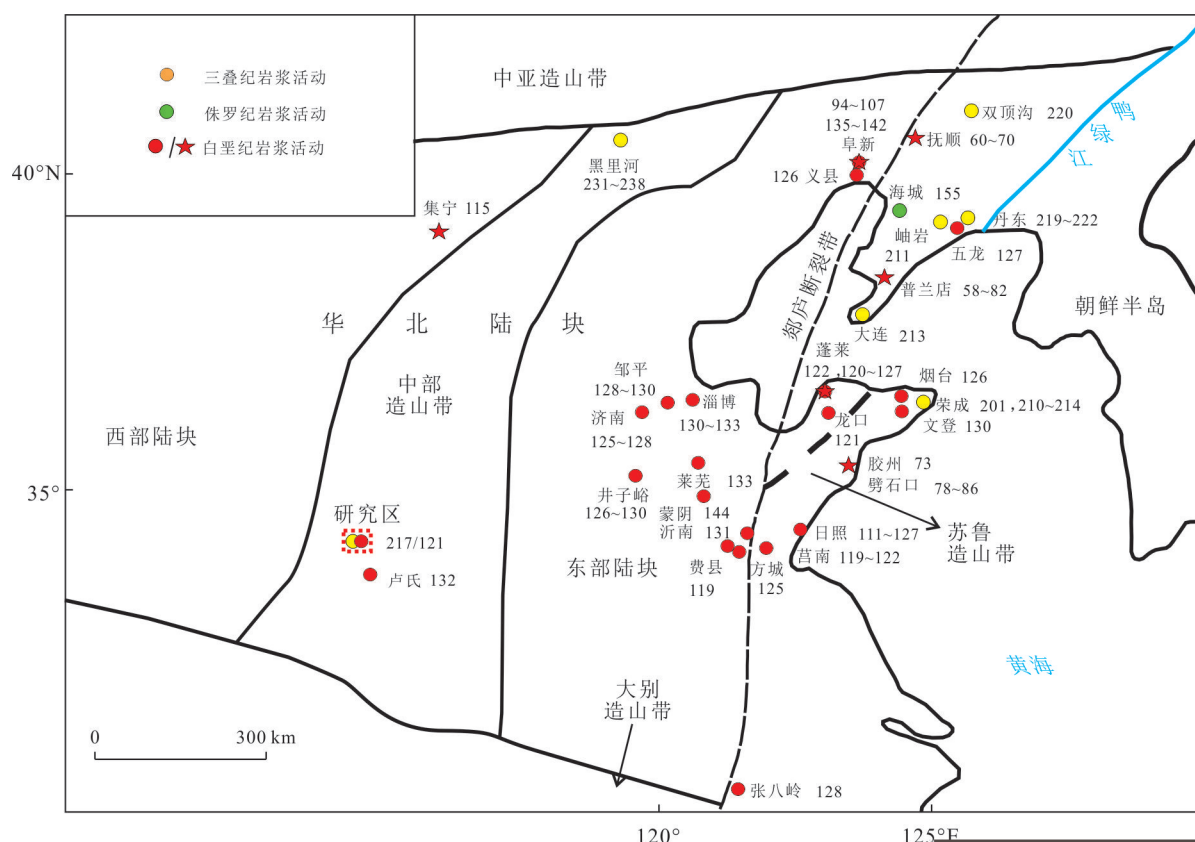


图1 华北克拉通中生代镁铁质岩浆岩分布

Fig.1 The distribution of Mesozoic mafic magmatic rocks in the North China craton

图中数字表示年龄,单位为Ma;五角星代表洋岛型岩浆岩,圆形代表岛弧型岩浆岩.数据引自Guo *et al.* (2014), Ma *et al.* (2014), Hong *et al.* (2017), Deng *et al.* (2017), 郑永飞等(2018), Yang *et al.* (2019), Li *et al.* (2020), Liu *et al.* (2020), Quan *et al.* (2020)及 Zhao *et al.* (2020)

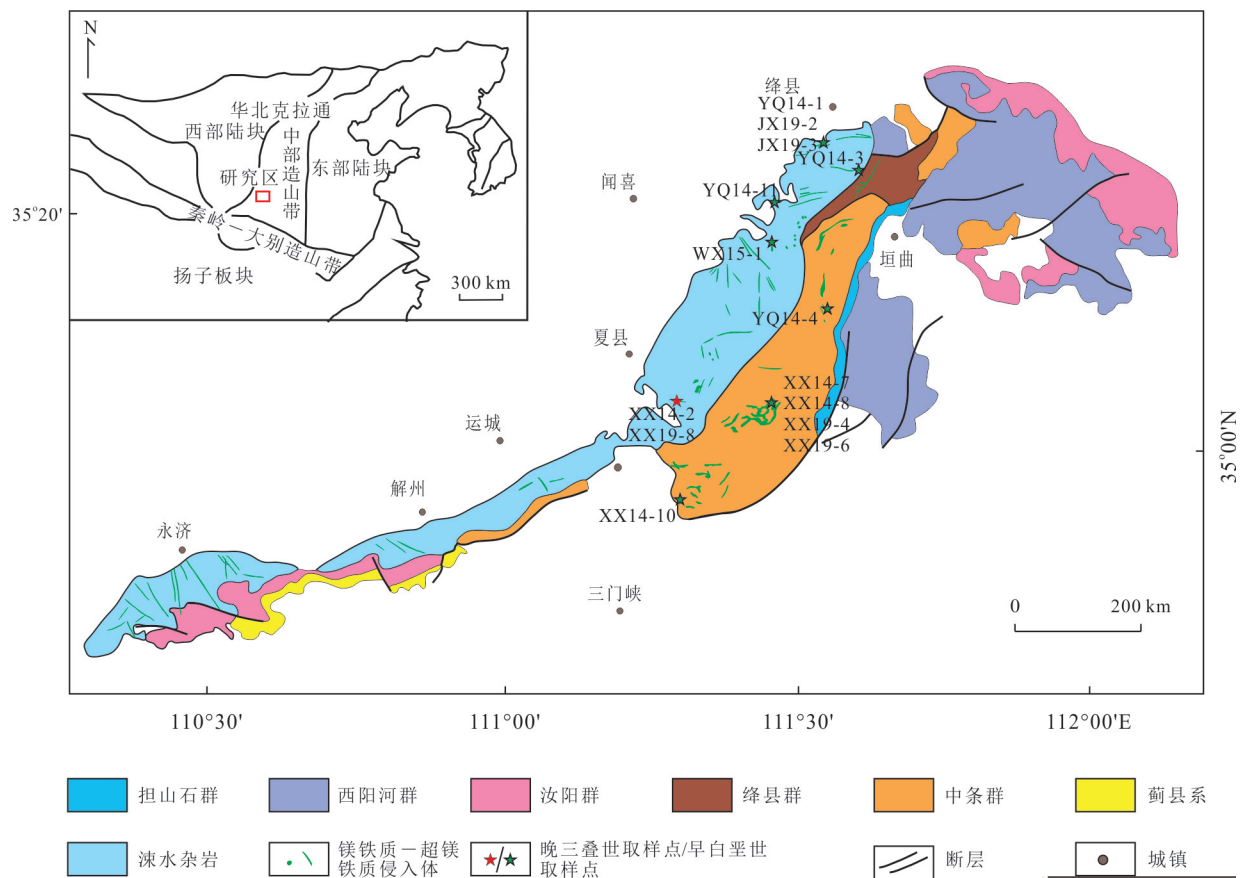


图2 华北克拉通基底构造单元划分(根据 Zhao *et al.*, 2000 修改)及研究区位置(a);中条山地区地质简图采样位置(b)
Fig.2 Division of basement tectonic units in the North China craton and the location of study area (a); geological sketch map of the Zhongtiao Mountain area and sampling locations (b)

具有多色性,观察到二级干涉色,呈半自形—自形粒状或柱状,颗粒较大,具有明显的两组解理(图 4a~4c)。

早白垩世基性岩主要包括角闪闪长岩和辉绿岩(或辉长岩)两种岩性,在野外路堑剖面可观察到岩石结构(矿物粒度)发生连续变化(图 3b~3e)。角闪闪长岩(图 4d)主要由~55%斜长石和~45%角闪石组成。斜长石大部分发生蚀变而表面浑浊,角闪石表现为黄绿色,柱状,具有角闪石式的两组解理。辉绿岩(图 4e~4f)矿物组合为~45%斜长石与~55%普通辉石,二者构成典型的辉绿结构,他形辉石充填于自形程度较高的斜长石形成的三角空隙中。

2 分析方法

文章所需的岩石光薄片、全岩粉末样品制备及单矿物锆石挑选均在河北省区域地质矿床调查研究所完成;锆石 CL 成像和 SIMS U-Pb 定年、造岩

矿物主量元素分析和全岩 Sr-Nd 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成,单矿物微量元素分析在河北地质大学区域地质与成矿作用重点实验室完成,全岩主、微量元素分析在贵州同微测试公司完成,锆石 Lu-Hf 同位素测试在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成。

2.1 单矿物主、微量元素分析

选取野外采集到的新鲜岩石样品,切割代表性剖面,制成光薄片,在偏光显微镜下鉴定后标记出待测矿物位置,对薄片镀碳后进行单矿物微区原位主量元素测试。分析仪器为日本 JEOL 公司生产的配有 4 道波谱仪(WDS)和 OXFORD 公司 INCA 能谱仪(EDS)的 JXA-8100 型电子探针,实验条件为加速电压 15 kV,电子束流为 10 nA,电子束斑根据不同矿物颗粒在 1~5 μm 之间变化,采用 ZAF 校正(即通过原子序数校正因子、吸收校正因子、荧光校正因子,将实测的 X 射线强度比 K 值转换为重量浓度)。

在偏光显微镜下鉴定后标记矿物位置,对薄片

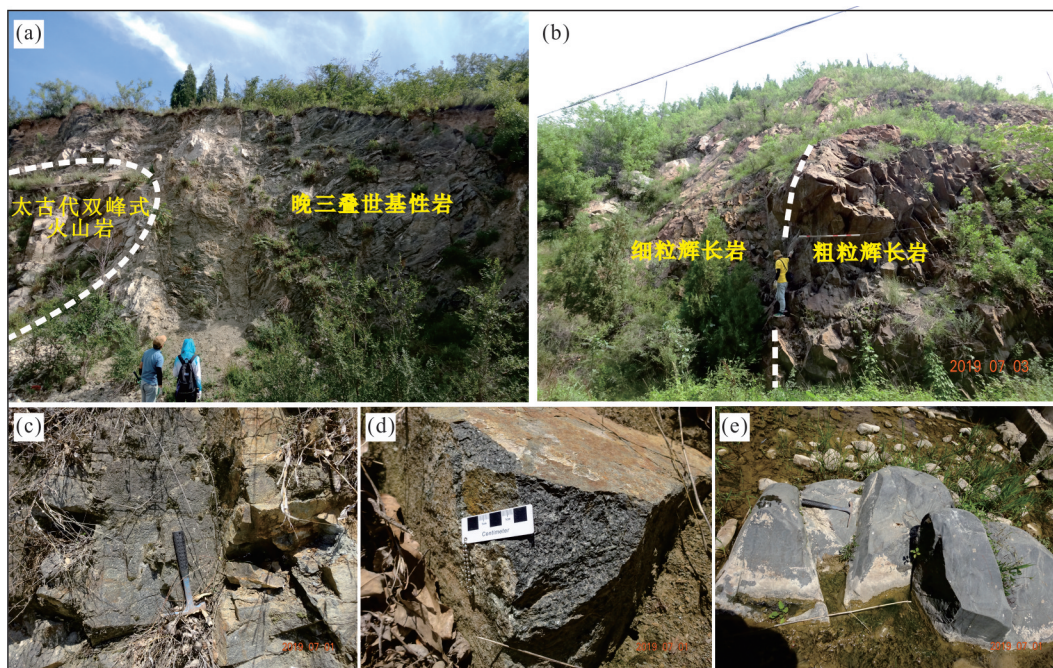


图3 中条山镁铁质岩石野外照片

Fig.3 Field photographs of mafic rocks in the Zhongtiao Mountain area

a. 晚三叠世基性岩与围岩接触关系; b. 早白垩世辉长岩; c. 早白垩世细粒辉长岩; d. 早白垩世粗粒辉长岩; e. 早白垩世辉绿岩

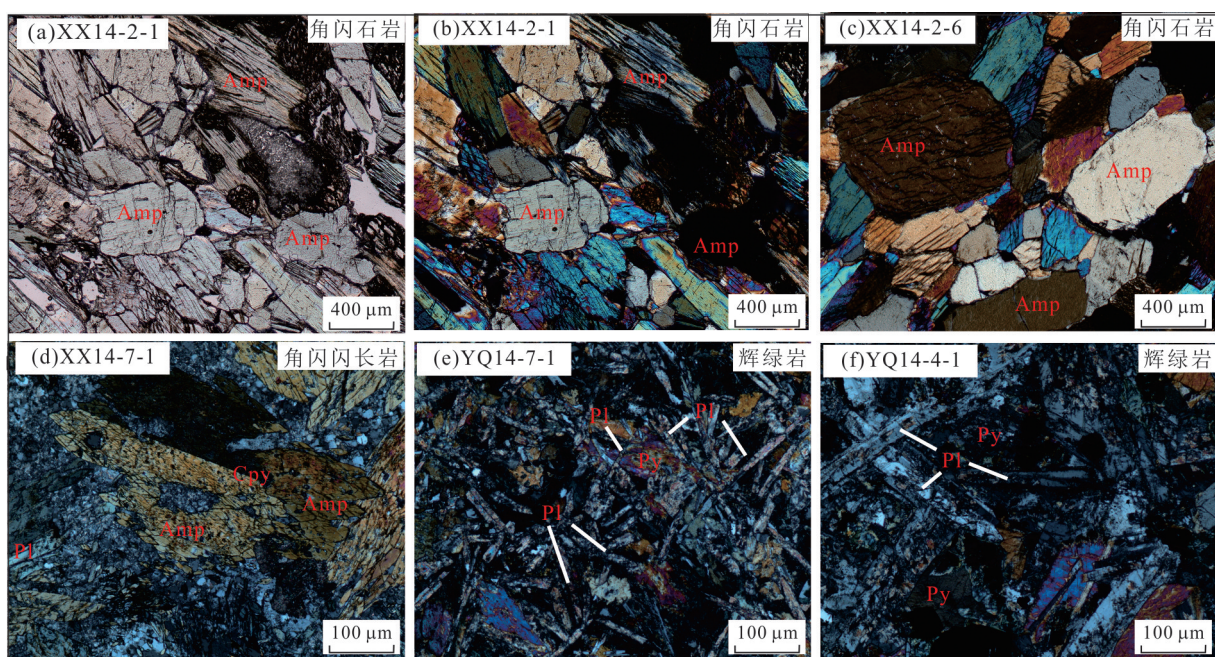


图4 中条山镁铁质侵入岩显微照片

Fig.4 Microphotographs of mafic rocks from the Zhongtiao Mountain area

a~c. 为晚三叠世侵入岩; d~f. 为早白垩世侵入岩. 图a为单偏光照片, 图(b~f)为正交偏光照片. Amp. 角闪石; Pl. 斜长石; Py. 辉石

镀碳后进行单矿物微量元素测试. 激光剥蚀系统采用搭载 Laurin Technic S155 样品池和 GeoStar μ GISTM 软件的澳大利亚 RESOLUTION-LR 型高能量 ArF₂ 准分子激光剥蚀系统, 质谱仪为美国赛默飞

iCAP RQ 型等离子体质谱仪. 激光剥蚀条件为: 激光束斑直径 60 μ m, 激光能量密度 3 J/cm², 剥蚀频率 8 Hz. 剥蚀前采集 10 s 的空白, 随后进行 40 s 的样品剥蚀, 剥蚀完成后进行 20 s 的吹扫. 载气使用高纯

度氮气,气流量为 0.6 L/min;辅助气为 Ar 气,气流量为 0.8 L/min. 微量元素分析用玻璃标准 NIST 610 作为外标,用 EMPA 法直接测定硅酸盐矿物中的 ^{29}Si 作为内标. 以玻璃标准 NIST 612 为未知量对数据质量进行监测. 使用 Iolite 4.1 进行数据处理和浓度计算(Paton *et al.*, 2010). 微量元素的测定精度一般在 5% 以上.

2.2 锆石 U-Pb 定年与 Lu-Hf 同位素分析

将用于 U-Pb 定年的岩石样品机械破碎至 50~80 目,利用重选和磁选技术分选出非磁性重矿物锆石. 在双目镜下挑选颗粒大,包裹体少,无明显裂隙且晶型完好的锆石颗粒,与锆石标样 Plésovice (Sláma *et al.*, 2008) 和 Qinghu (Li *et al.*, 2009) 一起粘贴到环氧树脂靶上,然后抛光使其曝露一半晶面. 对锆石进行透射光、反射光显微照相以及阴极发光 (CL) 图像分析(由德国 LEO-1450VP 扫描电子显微镜完成,工作电压 20 kV,电流 2~20 nA),以观察锆石的内部结构,帮助选择适宜的测试点位. 图像采集完成后,用于二次离子质谱仪 (SIMS) 分析的样品靶需在真空中镀金以备分析. U、Th、Pb 的测定在 CAMECA IMS-1280 离子探针上进行,详细的分析方法见 Li *et al.* (2009). 以 O^{2-} 为离子源,强度 10 nA,加速电压 -13 kV,分析束斑约 $20\text{ }\mu\text{m} \times 30\text{ }\mu\text{m}$. 锆石标样与待测样品按 1:3 比例交替测试. 标准锆石 Plésovice ($337.1 \pm 0.4\text{ Ma}$, Sláma *et al.*, 2008) 用于校正 U-Th-Pb 同位素比值,标准锆石 Qinghu ($159.5 \pm 0.2\text{ Ma}$, Li *et al.*, 2009) 作为未知样监测数据的精确度.

锆石微区原位 Lu-Hf 同位素分析采用美国 ASI (Applied Spectra Inc.) J-100 飞秒激光和 Neptune MC-ICP-MS (Thermo Finnigan) 联用技术,采用 8 Hz 的激光频率、剥蚀坑尺寸为 $20\text{ }\mu\text{m} \times 40\text{ }\mu\text{m}$,能量密度为 1.5 J/cm^2 ,剥蚀时间为 31 s. 由于锆石中 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值非常低(通常小于 0.002), ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 同质异位素干扰可以忽略,根据 Yb 自然丰度,以及测试得到的 $^{173}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}$ 值以扣除 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的干扰. 锆石 Hf 同位素分析点与锆石 U-Pb 年龄分析点尽量重合或者位于同一环带内,以使 Hf 同位素分析与锆石 U-Pb 年龄分析相对应.

2.3 全岩元素地球化学分析

全岩主量元素分析利用帕纳科 Zetium XRF 分析完成. 将样品处理后倒入 XRF 专用铂金坩埚中,置于熔样炉中 $1\text{ }100\text{ }^\circ\text{C}$ 熔融,熔样程序运行结束后

钳取出坩埚,摇晃坩埚将熔体中的气泡赶出并使熔体充满坩埚底,再转移到耐火砖上冷却,然后将玻璃片取出,贴上标签,以备 XRF 测试. 样品分析的精密度和准确度满足 GB/T 14506.28-2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第 28 部分:16 个主次成分量测定》的要求. 全岩微量元素分析采用配有 Cetac ASX-560 自动进样器的 Thermal Fisher iCAP RQ 型电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定,参照标准为美国地质调查局 (USGS) 标准 W-2a,并与 BHVO₂ 等参照材料进行交叉比对. 微量元素分析的 ICP-MS 方法遵循 Eggins *et al.* (1997) 的方法,并按照 Kamber *et al.* (2003) 和 Li *et al.* (2005) 的方法进行了修改.

2.4 全岩 Sr-Nd 同位素分析

将适量岩石粉末样品与 ^{87}Rb - ^{84}Sr 、 ^{149}Sm - ^{150}Nd 稀释剂混合,并使用纯化的 $\text{HF-HNO}_3\text{-HClO}_4$ 试剂在高温下溶解样品. Rb、Sr、Sm、Nd 元素分离采用两阶段离子交换层析法,同位素分析在德国 Finnigan 公司 MAT-262 型多接收热电离质谱仪 (ID-TIMS) 上完成. 化学分离和上机测试流程参考 Li *et al.* (2015). 在全部分析过程中, Rb-Sr 和 Sm-Nd 的本底分别小于 300 pg 和 100 pg. 利用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.721\text{ }9$ 和 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.119\text{ }4$ 对测得的同位素比值标准化,以进行质量分馏校正. 采用国际标样 NBS-987 Sr 和 JNdi-1 Nd 监控仪器稳定性,标样 BCR-2 监控整个测试流程的准确度.

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年结果

锆石 U-Pb 分析结果见表 1. 晚三叠世镁铁质侵入岩的锆石呈半自形—他形晶,长约 45~60 μm ,宽约 25~40 μm . 阴极发光图像显示大部分锆石呈较均匀的暗灰色,但可观察到振荡环带(图 5). 大部分锆石 Th/U 比值变化于 0.296~1.373,指示其为岩浆成因锆石. XX14-2-1 样品中所有分析点均落在谐和曲线上或者附近,其中 8 颗年轻锆石谐和年龄为 $216.7 \pm 2.3\text{ Ma}$ (MSWD=0.035); 其余 5 颗为前寒武纪捕虏晶,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄变化于 $2\text{ }404 \sim 1\text{ }402\text{ Ma}$ (图 6a~6b).

早白垩世镁铁质岩石中锆石显示半自形—自形短柱状,锆石颗粒较小,长度介于 20~90 μm ,长宽比约为 1:1~3:1. 大部分锆石发光微弱,可观察到振荡环带(图 5). XX14-7-1 样品中 4 个分析点给出了 $121 \pm 1.8\text{ Ma}$ (MSWD=1.06) 的谐和年龄,其余

表 1 华北克拉通中条山地区镁铁质岩石锆石 U-Pb 同位素年代学测试结果																
Table 1 Zircon U-Pb isotopic data and ages of mafic rocks from Zhongtiao Mountain area, North China craton																
分析点	Th	U	Th/	Pb	同位素比值						年龄 (Ma)					
No.	(10 ⁻⁶)	(10 ⁻⁶)	U	(10 ⁻⁶)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
XX14-7-1@3	473	400	1.18	11	0.048 80	1.64	0.125 49	2.24	0.018 7	1.53	138.1	38.0	120.0	2.5	119.1	1.8
XX14-7-1@4	783	693	1.13	18	0.054 56	14.85	0.140 66	14.94	0.018 7	1.66	394.2	302.5	133.6	18.9	119.4	2.0
XX14-7-1@5	854	701	1.22	19	0.047 63	1.71	0.124 42	2.28	0.018 9	1.50	81.1	40.1	119.1	2.6	121.0	1.8
XX14-7-1@1	3 620	1 434	2.52	51	0.049 20	0.92	0.128 85	1.76	0.019 0	1.50	157.3	21.4	123.1	2.0	121.3	1.8
XX14-7-1@2	383	386	0.99	10	0.048 57	1.64	0.129 11	2.22	0.019 3	1.51	127.3	38.0	123.3	2.6	123.1	1.8
XX14-7-1@7	9 634	21 605	0.45	1 159	0.051 85	1.60	0.333 74	2.20	0.046 7	1.51	278.9	36.3	292.4	5.6	294.1	4.3
XX14-7-1@6	3 973	3 167	1.25	259	0.065 99	9.69	0.533 90	9.82	0.058 7	1.60	806.2	190.7	434.4	35.3	367.6	5.7
WX15-1-1@08	192	323	0.59	6	0.039 51	27.70	0.092 86	27.74	0.017 0	1.50	—382.8	598.8	90.2	24.2	109.0	1.6
WX15-1-1@02	165	224	0.74	5	0.049 01	24.10	0.120 27	24.22	0.017 8	2.35	148.1	484.7	115.3	26.8	113.7	2.7
WX15-1-1@03	112	203	0.55	5	0.045 31	16.37	0.115 58	16.47	0.018 5	1.83	—38.8	356.0	111.1	17.5	118.2	2.1
WX15-1-1@11	143	246	0.58	6	0.047 96	6.10	0.125 09	6.39	0.018 9	1.89	97.1	138.4	119.7	7.2	120.8	2.3
WX15-1-1@14	53	115	0.46	3	0.047 83	4.84	0.127 10	5.10	0.019 3	1.62	90.9	110.8	121.5	5.9	123.1	2.0
WX15-1-1@10	584	716	0.82	18	0.046 84	3.05	0.124 50	3.44	0.019 3	1.58	40.9	71.5	119.1	3.9	123.1	1.9
WX15-1-1@13	738	961	0.77	25	0.047 78	1.47	0.132 40	2.23	0.020 1	1.68	88.3	34.4	126.3	2.7	128.3	2.1
WX15-1-1@07	215	244	0.88	9	0.050 16	2.39	0.190 80	2.91	0.027 6	1.66	202.4	54.7	177.3	4.7	175.4	2.9
WX15-1-1@12	419	986	0.43	44	0.052 28	1.28	0.273 62	2.60	0.038 0	2.27	297.8	28.9	245.6	5.7	240.2	5.3
WX15-1-1@06	421	1 242	0.34	57	0.051 15	0.88	0.278 30	2.29	0.039 5	2.12	247.7	20.1	249.3	5.1	249.5	5.2
WX15-1-1@1	619	948	0.65	47	0.051 57	0.97	0.282 57	2.19	0.039 7	1.97	266.2	22.1	252.7	4.9	251.2	4.8
WX15-1-1@05	207	339	0.61	17	0.051 65	1.17	0.294 16	2.03	0.041 3	1.66	270.1	26.7	261.8	4.7	260.9	4.2
WX15-1-1@15	382	504	0.76	45	0.055 54	0.62	0.526 21	1.63	0.068 7	1.51	434.0	13.7	429.3	5.7	428.4	6.3
WX15-1-1@17	116	718	0.16	120	0.069 20	0.34	1.420 72	1.63	0.148 9	1.59	904.6	6.9	897.7	9.7	894.8	13.3
WX15-1-1@09	28	39	0.72	8	0.069 59	4.47	1.538 74	4.97	0.160 4	2.18	916.3	89.2	946.0	31.1	958.8	19.5
WX15-1-1@16	290	421	0.69	154	0.103 84	0.25	4.016 38	1.56	0.280 5	1.54	1 693.9	4.6	1 637.5	12.8	1 593.9	21.8
WX15-1-1@04	162	413	0.39	207	0.136 29	0.23	7.553 82	1.58	0.402 0	1.56	2 180.6	4.1	2 179.4	14.3	2 178.1	29.0
XX14-2-1@4	123	398	0.31	16	0.049 02	4.57	0.236 81	4.81	0.035 0	1.50	148.6	103.8	215.8	9.4	222.0	3.3
XX14-2-1@16	280	751	0.37	29	0.049 07	4.45	0.224 64	4.70	0.033 2	1.50	151.1	101.1	205.8	8.8	210.6	3.1
XX14-2-1@5	663	1 151	0.58	48	0.050 22	0.90	0.237 18	1.75	0.034 3	1.50	205.4	20.7	216.1	3.4	217.1	3.2
XX14-2-1@12	211	478	0.44	19	0.050 23	1.79	0.232 39	2.34	0.033 6	1.51	205.7	40.9	212.2	4.5	212.7	3.2

续表1

分析点 No.	Th (10 ⁻⁶)	U (10 ⁻⁶)	Th/ U	Pb (10 ⁻⁶)	同位素比值						年龄 (Ma)					
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
					(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
XX14-2-1@9	174	400	0.44	16	0.050 62	1.85	0.238 43	2.40	0.034 2	1.52	223.4	42.2	217.1	4.7	216.6	3.2
XX14-2-1@6	297	732	0.41	30	0.050 76	1.12	0.240 77	1.87	0.034 4	1.51	230.0	25.6	219.0	3.7	218.0	3.2
XX14-2-1@14	528	1 082	0.49	44	0.050 97	1.66	0.239 97	2.24	0.034 1	1.50	239.3	37.8	218.4	4.4	216.5	3.2
XX14-2-1@13	424	1 025	0.41	42	0.050 99	1.34	0.245 63	2.02	0.034 9	1.50	240.4	30.7	223.0	4.0	221.4	3.3
XX14-2-1@2	218	736	0.30	213	0.090 27	0.32	3.055 31	1.54	0.245 5	1.50	1 431.3	6.2	1 421.6	11.8	1 415.0	19.1
XX14-2-1@3	21	691	0.03	234	0.117 20	0.37	4.885 07	1.55	0.302 3	1.50	1 914.0	6.6	1 799.7	13.1	1 702.7	22.5
XX14-2-1@1	48 347	83 766	0.58	32 946	0.117 64	15.04	5.697 18	15.20	0.351 2	2.20	1 920.7	247.6	1 930.9	140.5	1 940.5	36.9
XX14-2-1@11	3 361	3 007	1.12	885	0.119 50	0.22	3.434 59	1.52	0.208 4	1.50	1 948.8	4.0	1 512.3	12.0	1 220.5	16.8
XX14-2-1@10	534	389	1.37	239	0.145 02	0.56	7.986 34	1.60	0.399 4	1.50	2 288.0	9.7	2 229.5	14.6	2 166.4	27.7
XX14-2-1@8	327	589	0.56	336	0.158 45	0.40	9.494 85	1.55	0.434 6	1.50	2 439.2	6.8	2 387.0	14.4	2 326.4	29.4

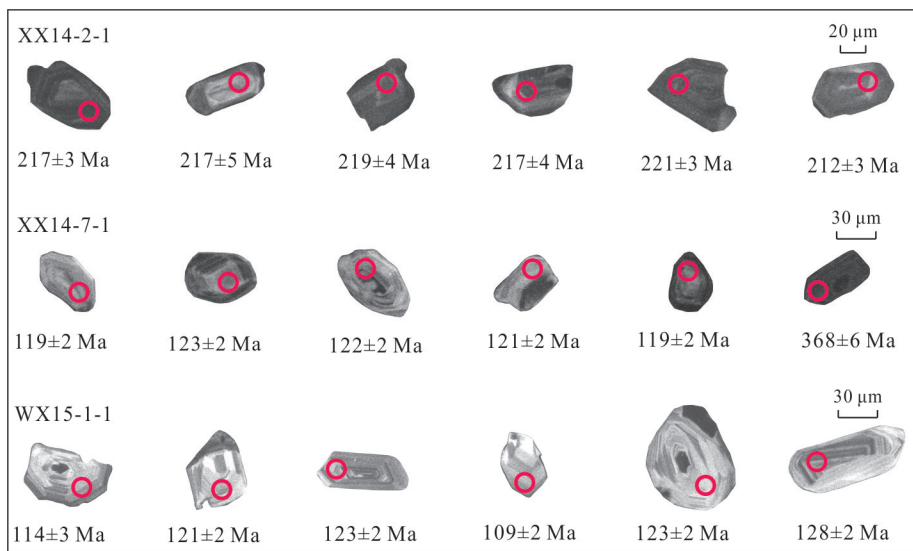


图5 中条山镁铁质岩石锆石阴极发光图像
Fig.5 CL images of zircons from the mafic rocks of Zhongtiao Mountain area

3 颗锆石具有高 Th($1\,434\times10^{-6}\sim3\,739\times10^{-6}$) 和 U ($3\,620\times10^{-6}\sim9\,634\times10^{-6}$) 含量, 晶格遭受放射性破坏, 不能给出有效的年龄信息(图 6c). WX15-1-1 样品中所有分析点均落在谐和曲线上及其附近, 其中 7 颗最年轻的锆石年龄平均值为 119.6 ± 6.3 Ma (图 6d).

3.2 全岩元素地球化学特征

中条山地区中生代镁铁质岩石的主、微量元素分析结果如附表 1 所示. 晚三叠世镁铁质侵入岩 SiO₂ 含量介于 46.03%~51.46%, 具有高 MgO 含量 (14.37%~18.61%)、Fe₂O₃^T (9.10%~11.94%) 和 CaO (11.06%~14.83%), 低 Al₂O₃ (3.24%~

5.57 %) 和 TiO₂ (0.24%~0.33 %). 其 Cr、Ni 含量分别为 $619\times10^{-6}\sim1\,847\times10^{-6}$ 和 $282\times10^{-6}\sim433\times10^{-6}$. 从 SiO₂-(Na₂O+K₂O) 图解(图 7a) 中可以看出该岩体属于亚碱性系列, 在 SiO₂-K₂O 图解(图 7b) 中属于低钾拉斑系列. 在微量元素蛛网图中(图 7c), 样品富集 Rb、Th、Pb、K, 亏损高场强元素(Nb、Zr、Ti), 与弧岩浆的性质相似. 在球粒陨石标准化稀土图解中, 晚三叠世镁铁质侵入岩的稀土分布模式与角闪石的稀土分布模式相似(图 7d), 中等富集轻稀土元素((La/Yb)_N=2.84~6.85), Eu 异常不明显($\delta_{Eu}=0.91\sim1.05$). 同样的“上凸”型稀土配分模式反映分离结晶以角闪石为主.

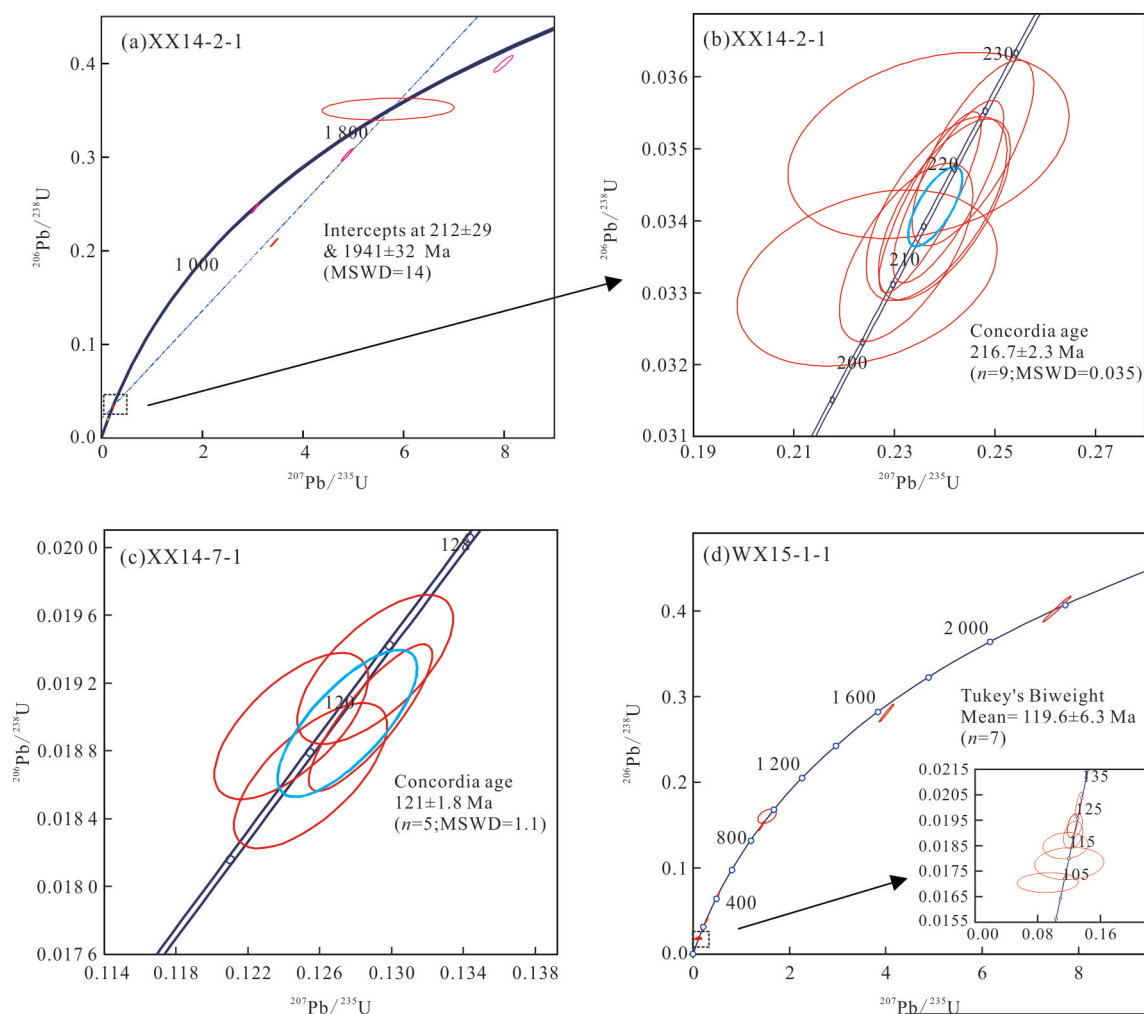


图6 中条山镁铁质岩石锆石U-Pb年龄谐和图

Fig.6 Zircon U-Pb concordia diagrams of mafic rocks in the Zhongtiao Mountain area

早白垩世镁铁质岩石 SiO_2 含量介于 49.23%~54.99%, MgO 含量为 4.29%~7.17%, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 和 Al_2O_3 含量分别为 9.70%~14.79% 和 12.63%~15.42%, 落在辉长岩和辉长闪长岩区域(图 7a), 属于高钾钙碱和钙碱性系列(图 7b). 在原始地幔标准化蛛网图解(图 7c)上, 富集 LILEs (如 Rb、Ba、K、Pb), 亏损 HFSEs (如 Ta、Nb、Zr、Hf). 早白垩世镁铁质侵入岩稀土元素分布型式(图 7d)较为平坦 ($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=2.67\sim9.41$), 具有弱的负 Eu 异常 ($\delta_{\text{Eu}}=0.79\sim1.03$).

3.3 矿物化学

晚三叠世角闪石岩电子探针数据见表 2. 其主要造岩矿物角闪石 SiO_2 含量为 53.29%~54.51%, FeO 含量为 7.92%~8.40%, Al_2O_3 含量为 2.74%~3.30%, $\text{Mg}^{\#}(100 \times \text{MgO}/(\text{MgO} + \text{FeO}^{\text{T}}))$ 为 80~81. 角闪石 $\text{Al}^{\text{VI}} < 0.6\text{Al}^{\text{VI}} + 0.25$, 表明其均为岩浆作

用产物(邵济安等, 2015). 角闪石的 $\text{Mg}^{\#}$ 可以用于判别岩石成因, 幔源型角闪石 $\text{Mg}^{\#}$ 值大于 70, 壳源型 $\text{Mg}^{\#}$ 值小于 50(姜常义和安三元, 1984), 晚三叠世角闪石 $\text{Mg}^{\#}$ 反映了幔源母岩浆的性质.

角闪石的微量元素数据列于表 3. 微量元素蛛网图(图 7c)具有明显的 Nb、P、Ti、Zr 亏损; 角闪石的稀土元素配分曲线呈上凸型(图 7d), 在 Pr-Nd 构成上凸的峰值, 与许多典型堆晶岩中的角闪石的 REE 分布模式相似(马旭等, 2009).

3.4 全岩 Sr-Nd 同位素特征与锆石 Hf 同位素特征

全岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素分析结果见表 4 和图 8a. 中生代镁铁质侵入岩具有明显富集的 Sr-Nd 同位素组成, 其中 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 $-18.56\sim-12.64$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.708 42~0.733 54. 在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(图 8a)上两期岩石分别落入辽东半岛晚三叠世基性岩和胶东半岛早白垩世基性岩范围内.

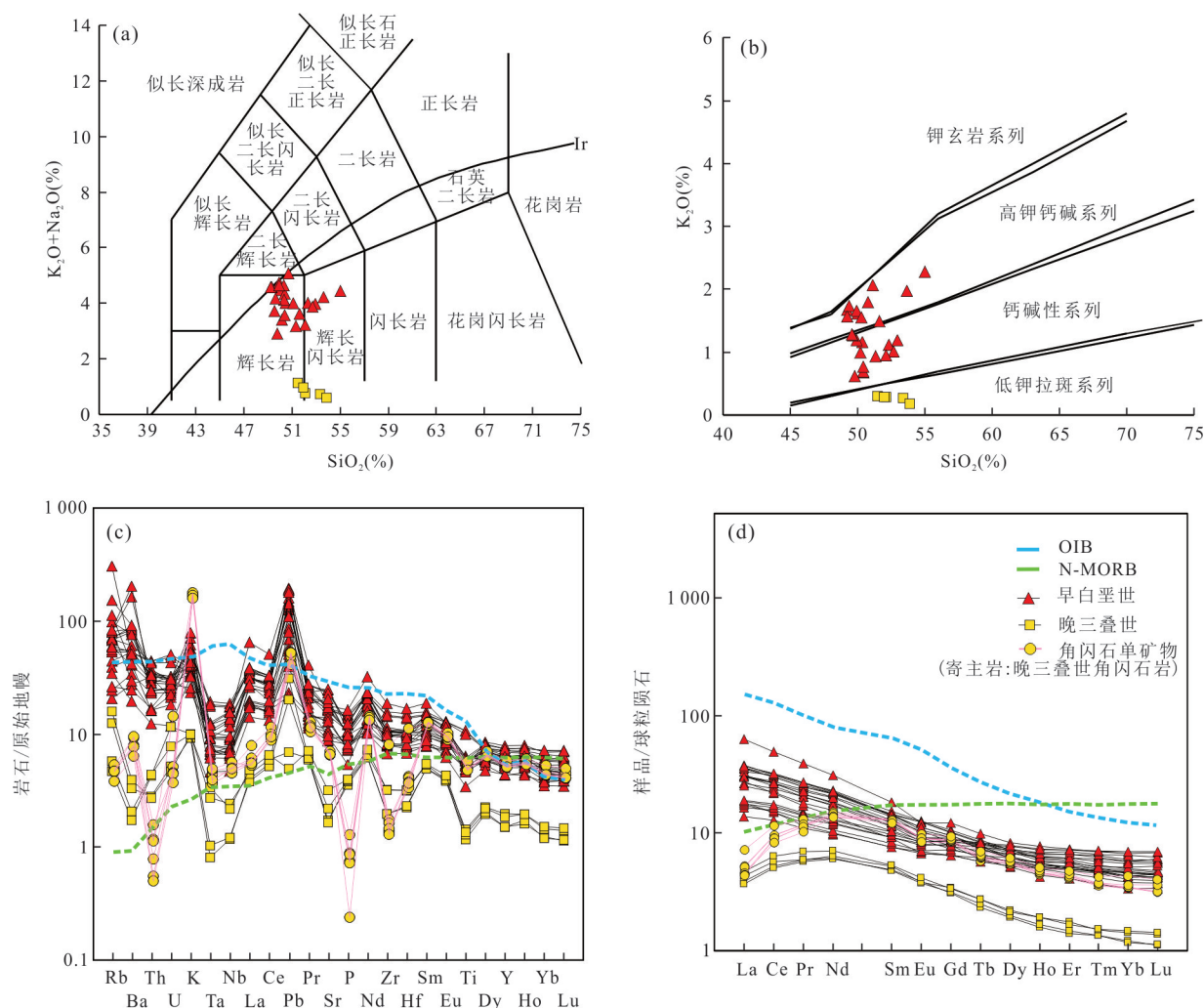


图 7 中条山镁铁质岩石元素地球化学特征

Fig. 7 Elemental geochemical characteristics of mafic rocks in the Zhongtiao Mountain area

a. TAS 分类图解 (据 Middlemost, 1994); b. SiO_2 - K_2O 图解 (据 Peccerillo and Taylor, 1976); c. 原始地幔标准化微量元素蛛网图 (据 Sun and McDonough, 1989); d. 球粒陨石标准化稀土元素配分曲线 (据 Sun and McDonough, 1989)

锆石原位 Hf 同位素分析结果见表 5 和图 8b. 晚三叠世镁铁质侵入岩锆石的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 比值为 $0.282\,566\sim 0.282\,935$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-2.8\sim +10.4$. 早白垩世镁铁质侵入岩锆石的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 比值为 $0.282\,124\sim 0.282\,928$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-20.2\sim +9.9$.

4 讨论

4.1 岩石成因

4.1.1 岩浆期后蚀变作用与元素活动性 鉴于部分样品造岩矿物发生明显蚀变, 对应的烧失量也偏高 ($1.5\%\sim 3.0\%$), 在讨论岩石成因之前我们先评估岩浆期后蚀变作用对元素活动性的影响. 首先, 绝大部分样品无论在野外露头尺度还是镜下微观尺度都保留了典型的岩浆岩结构. 其次, 两期岩石

样品在微量元素蛛网图和稀土元素配分图解上均显示近平行一致的分布模式 (图 7c~7d), 并且不发育 Ce 异常, 指示这些元素保留了原始的岩浆组成信息 (Polat *et al.*, 2002). 因 Zr 在大多数岩浆期后蚀变与变质作用中活动性均较差, 我们可用该元素来监测其他元素的活动性 (Polat *et al.*, 2002). 如图 9 所示, 除个别异常值外, 多数样品的 MgO 、 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 、Nb、Ba、Th、U、Sr、Nd、Yb 均与 Zr 呈较好的相关性, 说明这些元素在岩浆期后作用中活动微弱. 因此, 我们可以使用这些元素及相关同位素去示踪岩浆起源或探讨岩石成因.

4.1.2 晚三叠世镁铁质侵入岩 鉴于中条山晚三叠世镁铁质岩侵位于克拉通内部, 在探讨其岩浆起源和岩石成因之前我们首先评估陆壳混染的贡献.

表 2 华北克拉通中条山地区晚三叠世镁铁质岩石中角闪石电子探针成分(%)

Table 2 Electron microprobe analyses of amphibole in Late Triassic mafic rocks from Zhongtiao Mountain area, North China craton (%)

样品号	XX14-2-1							XX14-2-1						
矿物编号	AM1	AM2	AM3	AM4	AM5	AM6	AM7	AM8	AM9	AM10	AM11	AM12	AM13	AM14
SiO ₂	53.77	53.94	54.07	54.10	53.90	54.51	54.35	54.48	53.29	54.07	53.54	53.95	54.24	53.91
TiO ₂	0.19	0.16	0.14	0.19	0.14	0.10	0.14	0.20	0.15	0.13	0.15	0.14	0.09	0.13
Al ₂ O ₃	3.3	3.30	3.14	3.17	2.98	2.74	3.16	3.07	3.01	2.93	3.13	2.95	3.02	3.15
FeO	8.32	8.19	7.95	8.24	8.05	7.91	8.20	8.31	8.16	8.11	8.25	8.16	7.96	8.40
MnO	0.21	0.25	0.24	0.23	0.24	0.25	0.24	0.28	0.24	0.27	0.21	0.23	0.24	0.28
MgO	18.73	18.31	18.76	18.49	18.42	18.96	18.83	18.80	18.35	18.50	18.83	18.87	18.75	18.62
CaO	11.65	11.59	11.45	11.51	11.83	11.94	11.76	11.41	11.80	11.72	11.44	11.37	11.82	11.54
Na ₂ O	0.77	0.67	0.59	0.62	0.55	0.48	0.61	0.64	0.58	0.62	0.72	0.61	0.55	0.65
K ₂ O	0.15	0.13	0.11	0.14	0.10	0.08	0.11	0.13	0.13	0.09	0.13	0.12	0.15	0.12
Cr ₂ O ₃	0.24	0.30	0.17	0.21	0.13	0.16	0.17	0.17	0.18	0.21	0.23	0.09	0.13	0.10
NiO	0.04	0.04	0.02	0.04	0	0.01	0.05	0.05	0.08	0.04	0.05	0.01	0.06	0.08
Total	97.37	96.88	96.64	96.94	96.26	97.14	97.62	97.54	95.97	96.69	96.68	96.5	97.01	96.98
T														
Si	7.575	7.621	7.633	7.636	7.639	7.668	7.631	7.651	7.585	7.643	7.576	7.626	7.643	7.609
Al	0.412	0.365	0.358	0.351	0.353	0.320	0.356	0.334	0.410	0.347	0.417	0.368	0.345	0.384
Ti	0.021	0.017	0.015	0.020	0.015	0.010	0.015	0.021	0.014	0.014	0.016	0.015	0.010	0.013
C														
Al	0.135	0.184	0.164	0.176	0.133	0.134	0.166	0.174	0.095	0.142	0.104	0.124	0.156	0.140
Cr	0.026	0.034	0.019	0.023	0.015	0.018	0.019	0.018	0.020	0.023	0.025	0.010	0.015	0.011
Fe ³⁺	0.249	0.215	0.252	0.229	0.224	0.229	0.239	0.265	0.246	0.234	0.276	0.282	0.229	0.285
Mg	3.930	3.851	3.940	3.883	3.893	3.976	3.941	3.927	3.892	3.899	3.953	3.964	3.940	3.913
Fe ²⁺	0.691	0.741	0.646	0.714	0.737	0.679	0.680	0.652	0.736	0.721	0.654	0.632	0.690	0.668
Mn ²⁺	0.003	0.009	0.005	0.005	0.006	0.007	0.006	0.008	0.006	0.010	0.002	0.002	0.006	0.009
B														
Ca	1.766	1.761	1.738	1.748	1.807	1.808	1.775	1.721	1.811	1.784	1.743	1.731	1.793	1.753
Na	0.152	0.189	0.172	0.181	0.176	0.143	0.148	0.170	0.163	0.181	0.153	0.164	0.163	0.163
A														
Na	0.058	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.019	0.005	0.000	0.000	0.045	0.003	0.000	0.014
K	0.018	0.014	0.010	0.016	0.009	0.003	0.009	0.013	0.017	0.007	0.016	0.013	0.017	0.013
Mg [#]	0.80	0.80	0.81	0.80	0.80	0.81	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.81	0.80

注:离子数计算结果据 Li *et al.*, 2020. 标准的角闪石晶体化学通式为: A0~1 B2 C₅^{VI} T₈^{IV} O2 2(OH,F,Cl), 其中, A 为 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、(H₃O)⁺; B 为 Na⁺、Li⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺、Mn²⁺; C 为 Mg²⁺、Fe²⁺、Mn²⁺、Al³⁺、Fe³⁺、Ti⁴⁺、Cr³⁺; T 为 Si⁴⁺、Al³⁺、Fe³⁺、Ti⁴⁺、Cr³⁺, 式中上角注的罗马数字表示配位数, 下角注的阿拉伯数码表示原子数.

全岩元素化学分析表明大多数岩石样品(11.2~25.2)具有相对平均陆壳(12~13, Rudnick and Gao, 2003)较高的 Nb/Ta 比值, 并显著亏损 Th, 轻度富集 Pb, 均指示陆壳混染的影响较弱. 此外, 结晶分异也是岩浆上侵过程中化学组成演变的重要方式. 晚三叠世镁铁质侵入岩主要岩性为角闪石岩, 主要造岩矿物角闪石呈粗粒自形, 指示岩石为堆晶成因(图 4c), 该推断符合岩石高 MgO(14.37%~18.61%)、Fe₂O₃^T(9.10%~11.94%)、Ni(282×

10⁻⁶~433×10⁻⁶)、Cr(619×10⁻⁶~1 847×10⁻⁶), 以及低亲岩浆元素 Nb、Zr 等特征. 全岩样品所呈现的“角闪石式”上凸型稀土配分模式(图 7d)也契合角闪石堆晶(Halama *et al.*, 2004).

Holloway and Burnhan(1972)的熔融实验表明: 只有在基性熔体中含水量>3%时, 角闪石才能结晶. 晚三叠世堆晶岩中角闪石高度富集, 指示母岩浆具有高含水量(Ding *et al.*, 2016). 利用岩石中角闪石的镁指数(Mg[#]=80~81)和 Fe/Mg 在角闪石与

表 3 华北克拉通中条山地区晚三叠世镁铁质岩石中角闪石微量元素 (10^{-6}) 分析结果 (样品号: XX19-8-1)

Table 3 Trace element compositions (10^{-6}) of amphibole in Late Triassic mafic rocks from Zhongtiao Mountain area, North China craton (Sample No. XX19-8-1)

编号	AM1	AM2	AM3	AM4	AM5	AM6	AM7	编号	AM1	AM2	AM3	AM4	AM5	AM6	AM7
Li	1.85	2.17	2.40	3.01	2.15	2.46	2.79	Ba	44.0	17.2	20.7	16.6	16.5	21.4	13.0
Mg	94 154	97 799	98 882	96 189	98 952	97 722	98 456	La	1.58	1.20	1.67	1.01	1.22	1.07	1.06
P	13.80	12.40	11.80	24.00	15.10	14.60	2.96	Ce	7.05	5.73	6.90	5.36	5.77	4.94	5.39
Ca	91 361	91 205	91 887	90 125	91 444	92 002	91 146	Pr	1.29	1.10	1.22	1.07	1.10	0.95	1.06
Sc	47.9	43.6	44.0	46.5	46.0	43.1	43.6	Nd	7.73	6.35	6.95	6.53	6.68	6.18	6.29
Ti	2 259	1 776	1 778	1 913	1 740	2 106	1 694	Sm	2.31	1.81	1.94	1.91	1.90	1.96	1.94
V	164	144	139	157	147	154	145	Eu	0.65	0.48	0.52	0.51	0.50	0.56	0.51
Cr	463	116	1 003	482	707	251	452	Gd	2.08	1.68	1.70	1.78	1.75	1.88	1.78
Mn	1 713	1 820	1 807	1 817	1 774	1 772	1 806	Tb	0.29	0.22	0.23	0.23	0.24	0.26	0.21
Fe	60 218	56 742	56 305	57 579	56 416	58 652	56 298	Dy	1.68	1.36	1.41	1.43	1.39	1.54	1.36
Co	70.1	68.1	68.5	68.1	67.0	69.5	67.1	Ho	0.33	0.25	0.26	0.27	0.26	0.28	0.25
Ni	304	312	313	316	321	311	322	Er	0.97	0.71	0.66	0.72	0.68	0.78	0.69
Cu	0.29	0.18	0.61	0.21	0.12	0.59	0.53	Tm	0.15	0.09	0.09	0.09	0.09	0.11	0.09
Zn	115	123	116	130	141	115	132	Yb	1.10	0.56	0.57	0.60	0.58	0.72	0.57
Rb	0.84	0.86	0.95	0.81	0.80	0.81	0.63	Lu	0.22	0.09	0.08	0.09	0.08	0.10	0.08
Sr	36.0	40.7	40.4	42.2	41.2	44.4	41.1	Hf	37.7	0.34	0.33	1.16	0.30	0.26	0.29
Y	8.71	6.36	6.43	6.83	6.68	7.58	6.46	Ta	0.08	0.05	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04
Zr	1 268.00	4.14	3.80	27.90	3.08	3.31	2.87	Pb	1.03	1.83	1.75	1.49	1.66	1.81	1.35
Nb	1.38	0.89	0.98	1.13	0.98	0.86	0.96	Th	0.09	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01
Mo	2.33	2.30	1.99	35.2	2.37	1.03	4.36	K	31 596	27 126	26 935	29 312	26 602	27 490	25 504
Cs	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00								

表 4 华北克拉通中条山地区镁铁质岩石的 Rb-Sr 同位素和 Sm-Nd 同位素组成

Table 4 Rb-Sr and Sm-Nd isotopic data of mafic rocks from the Zhongtiao Mountain area, North China craton

样品	年龄(Ma)	Rb(10^{-6})	Sr(10^{-6})	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Sm(10^{-6})
XX14-2-1	217	7.884	35.17	0.649 4	0.716 915	0.000 012	0.714 910 5	2.171
XX14-2-2	217	9.770	34.10	0.829 1	0.721 172	0.000 007	0.718 613 8	2.140
XX14-7-1	217	25.240	370.70	0.197 1	0.708 759	0.000 008	0.708 419 9	6.078
XX14-7-2	217	12.700	500.00	0.073 5	0.708 504	0.000 326	0.709 377 3	6.340
XX14-7-7	217	61.590	541.80	0.329 2	0.713 247	0.000 014	0.712 680 7	5.752
XX14-8-1	121	37.770	339.40	0.322 3	0.712 795	0.000 014	0.711 795 4	5.408
WX15-1-1	120	179.700	283.60	1.839 0	0.736 672	0.000 015	0.733 562 5	4.495
样品	Nd(10^{-6})	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{\text{DM}}(\text{Ma})$
XX14-2-1	8.160	0.158 2	0.511 935	0.000 006	0.511 711	-13.70	-12.64	3 319
XX14-2-2	29.040	0.126 7	0.511 684	0.000 009	0.511 584	-18.61	-17.53	2 555
XX14-7-1	29.600	0.129 4	0.511 634	0.000004	0.511 531	-19.59	-18.56	2 731
XX14-7-2	27.740	0.125 5	0.511 664	0.000 008	0.511 565	-18.99	-17.90	2 555
XX14-7-7	25.190	0.130 0	0.511 710	0.000 009	0.511 524	-18.11	-16.26	2 608
XX14-8-1	21.940	0.124 0	0.511 713	0.000 010	0.511 616	-18.05	-16.95	2 431

熔体之间的分配系数 ($K_D^{\text{Fe-Mg}} = (\text{Fe}/\text{Mg})_{\text{Amp}} / (\text{Fe}/\text{Mg})_{\text{Liq}} = 0.35$, Sisson and Grove, 1993), 估算出与角闪石平衡的熔体 $\text{Mg}^\#$ 为 58.3~59.9, 该值与相对高 SiO_2 的原始安山质岩浆 $\text{Mg}^\# (\geq 60)$ (Kelemen *et al.*, 2007) 十分接近. 这类富水的高镁 (原始) 安山质岩浆通常被认为起源于玄武质洋壳或俯冲沉积物衍生熔体/流体交代的地幔楔橄榄岩或辉石岩在水过饱和条件下部分熔融 (Hirose, 1997; Chen *et al.*,

表 5 华北克拉通中条山地区镁铁质岩石锆石 Hf 同位素组成

Table 5 Zircon Hf isotopic composition of mafic rocks from Zhongtiao Mountain area, North China craton

样品	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	Hf_i	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}^{\text{Hf}}$ (Ma)	T_{DM}^{C} (Ma)	U-Pb age (Ma)
XX14-2-1_04	0.029 7	0.001 1	0.282 935	0.000 017	0.282 928	+5.7	+10.4	453	592	222.0
XX14-2-1_05	0.040 3	0.001 5	0.282 870	0.000 019	0.282 862	+3.4	+7.9	552	746	217.0
XX14-2-1_06	0.033 2	0.001 2	0.282 862	0.000 014	0.282 856	+3.1	+7.7	558	760	218.0
XX14-2-1_09	0.031 8	0.001 2	0.282 866	0.000 015	0.282 859	+3.2	+7.9	552	752	217.0
XX14-2-1_12	0.043 0	0.001 5	0.282 874	0.000 018	0.282 866	+3.5	+8.0	546	739	213.0
XX14-2-1_13	0.043 3	0.001 8	0.282 566	0.000 018	0.282 557	-7.3	-2.8	995	1 431	221.0
XX14-2-1_14	0.027 8	0.001 1	0.282 823	0.000 017	0.282 817	+1.7	+6.4	611	848	217.0
XX14-2-1_16	0.063 5	0.002 2	0.282 890	0.000 019	0.282 879	+4.1	+8.4	533	711	211.0
XX14-7-1 05	0.023 4	0.000 9	0.282 253	0.000 044	0.282 249	-18.4	-15.9	1 407	2 174	121.0
XX14-7-1 01	0.020 6	0.000 8	0.282 239	0.000 039	0.282 235	-18.9	-16.3	1 424	2 204	121.3
XX14-7-1 02	0.020 4	0.000 8	0.282 201	0.000 038	0.282 197	-20.3	-17.6	1 477	2 288	123.1
WX15-1-1_02	0.038 9	0.001 4	0.282 871	0.000 018	0.282 866	+3.4	+5.8	549	801	114.0
WX15-1-1_03	0.031 8	0.001 2	0.282 817	0.000 017	0.282 812	+1.5	+4.0	622	920	118.0
WX15-1-1_08	0.036 4	0.001 4	0.282 842	0.000 017	0.282 837	+2.4	+4.7	590	869	109.0
WX15-1-1_10	0.040 9	0.001 5	0.282 845	0.000 019	0.282 840	+2.5	+5.1	587	854	123.0
WX15-1-1_11	0.042 2	0.001 5	0.282 855	0.000 025	0.282 849	+2.8	+5.4	574	835	121.0
WX15-1-1_13	0.015 6	0.000 6	0.282 124	0.000 015	0.282 120	-23.0	-20.2	1 576	2 452	128.0
WX15-1-1_14	0.035 7	0.001 3	0.282 798	0.000 020	0.282 793	+0.9	+3.5	652	960	123.0

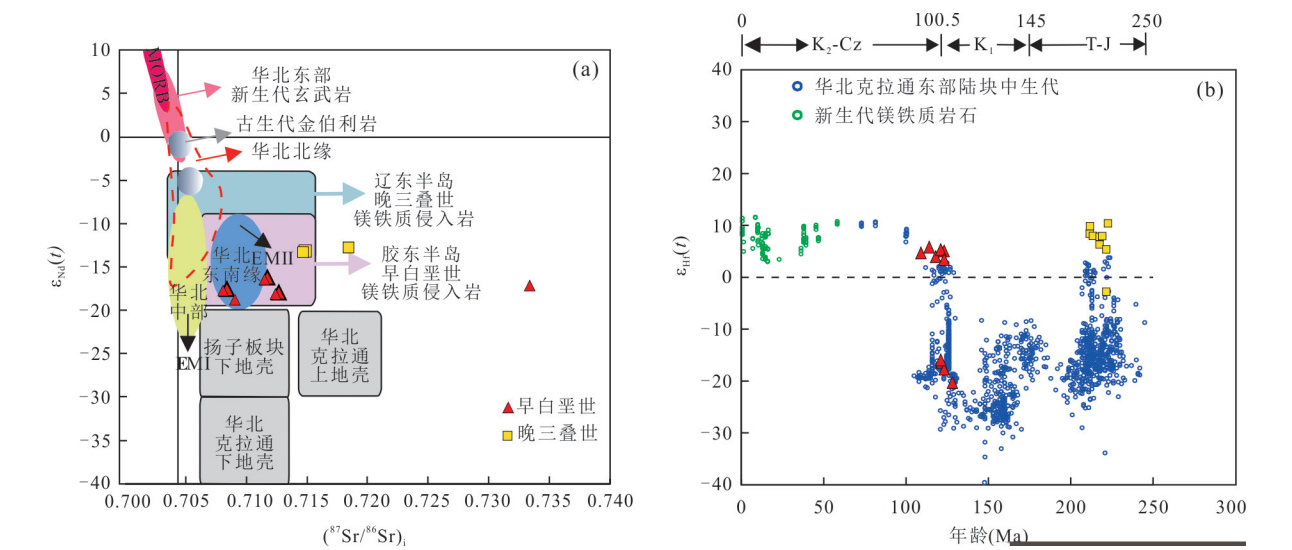


图 8 中条山镁铁质岩石 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解 (a) 与锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - \text{U-Pb}$ 年龄图解 (b)

Fig. 8 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (a) and zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. U-Pb age (b) diagrams of mafic rocks in the Zhongtiao Mountain area

图 a 底图据 Yang *et al.* (2019) 和汤艳杰等 (2021) 修改; 图 b 中华北克拉通东部陆块中一新生代镁铁质岩的数据引自 Liu *et al.* (2020); T-J. 三叠纪-侏罗纪; K₁. 早白垩世; K₂-Cz. 晚白垩世-新生代

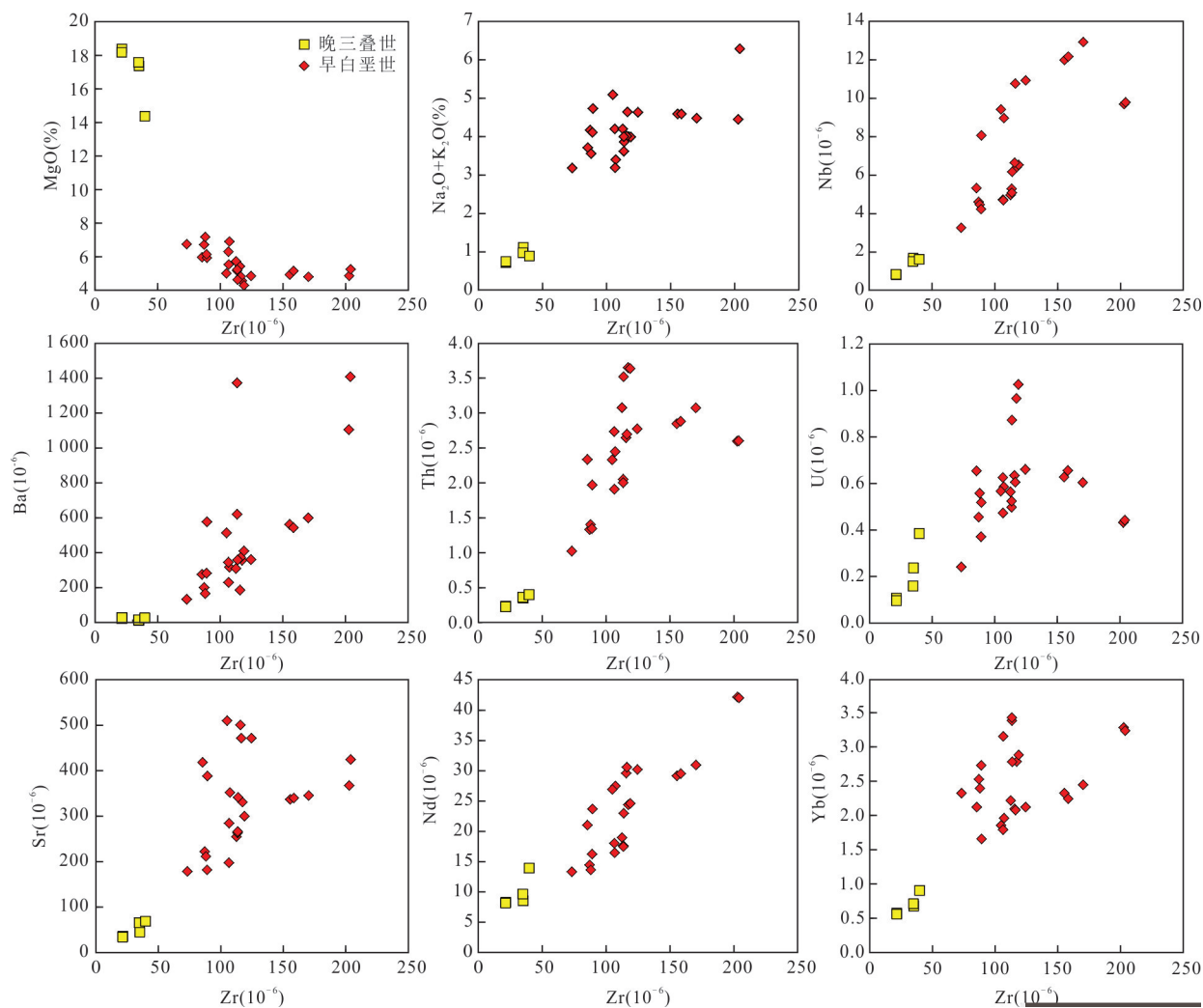
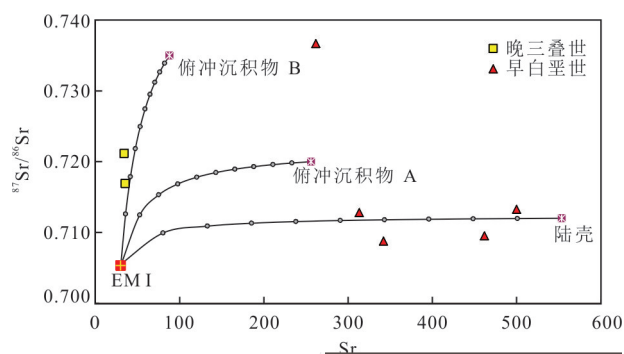


图 9 Zr 与其他元素的相关性图解

Fig. 9 The relationship of Zr with other elements

2014). 在原始地幔标准化蛛网图解上(图 7c), 晚三叠世镁铁质侵入岩样品的微量元素配分曲线近乎平行, LILE 与 HFSE 轻度分异, 反映交代地幔源区的固有属性. 同样, 单矿物角闪石所呈现的 Nb、Zr、Ti 负异常也指示母岩浆起源于经俯冲板片改造后的地幔楔部分熔融(Ma *et al.*, 2014). 综上所述, 晚三叠世角闪石岩可能结晶于高 MgO、Ni、Cr 和 LILE 的玄武质安山岩—高镁安山岩岩浆.

在同位素方面, 全岩样品具有富集的 Sr-Nd 同位素组成(图 8a), 暗示岩体母岩浆主要起源于富集地幔. 不同于克拉通中部造山带其他地区起源于 EM I 型地幔部分熔融的中生代镁铁质岩石(汤艳杰等, 2021; 及其参考文献), 中条山晚三叠世镁铁质侵入岩具有极高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$, 这与后者的地幔源区遭受了俯冲沉积物熔体/流体改造相吻合. 简单的两端元混合计算表明, 20% 左右的俯冲沉积物

图 10 中条山镁铁质岩石 Sr— $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解Fig. 10 Sr vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ plot of mafic rocks in the Zhongtiao Mountain area

揭示了俯冲陆壳与再循环沉积物在富集地幔源区形成过程中的作用, 模拟使用的参数见附表 2

与上述 EM I 型地幔混合可以形成晚三叠世岩石的交代源区(图 10). 此外, 锆石样品具有弱富集至亏

损的Hf同位素组成,与全岩Nd同位素发生明显解耦(图8).该同位素解耦现象通常归结为下述两方面原因:(1)源区部分熔融过程中存在亲重稀土元素(Lu)的石榴石残留相;(2)再循环沉积物中碎屑锆石所引起的Sm-Nd和Lu-Hf差异分馏.鉴于交代地幔源区在水饱和条件下发生部分熔融,石榴石为主要残留相的可能性不大.另一方面,当源区交代介质衍生于富含碎屑锆石的陆源沉积物时,大量非放射性成因Hf将进入锆石残留相并滞留于俯冲隧道中,交代地幔楔内的壳源物质信息只能由Sm-Nd同位素体系记录(Dai *et al.*, 2015).虽然经历了表壳物质衍生熔/流体的交代作用,中条山晚三叠世镁铁质岩的地幔源区仍具有相对典型克拉通岩石圈地幔略高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(图8a),暗示在岩石形成过程中有少量软流圈新生物物质加入.然而因封闭温度较低,全岩Sm-Nd同位素有足够的时间达到均一,难以保存初始岩浆的组成信息.该推断符合部分锆石样品所记录的正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值.

堆晶岩通常被认为形成于伸展背景下,包括板内裂谷带、活动陆缘弧后区以及造山带后碰撞环境等(邵济安等, 2015). 闫全人等(2007)对勉略带中蛇绿岩残片的研究表明,新元古代期间存在分隔中国华北陆块和扬子大陆板块的古秦岭洋,斜峪关群和草滩沟群作为早古生代早期板块俯冲、增生造山作用的产物,证实古秦岭—大别洋壳在早古生代开始向华北陆块俯冲.在此过程中,大洋地壳携带海沟沉积物俯冲到大陆边缘之下,所形成的熔体与上覆地幔楔橄榄岩发生化学反应形成地幔交代岩,即玄武质—安山质—流纹质火山弧岩浆组合的源区(郑永飞等, 2015). 240~225 Ma 扬子大陆板块在早中生代向华北克拉通俯冲,继承先前的洋壳俯冲带形成了陆壳俯冲带,直至先期俯冲的大洋板片因负浮力发生断离进入深部地幔,或加厚下地壳榴辉岩化引起岩石圈拆沉,导致软流圈上涌,诱发早先形成的岩石圈地幔交代岩发生部分熔融,产生的镁铁质岩浆可能混合了部分软流圈新生物物质,进入下地壳后在相对封闭的岩浆房中经历分离结晶,形成堆晶岩(高山等, 2003; 郑永飞等, 2015). 这种幔源物质的直接添加是华北下部陆壳早中生代增生的重要方式,可能也是影响华北克拉通中生代“活化”的重要因素(邵济安等, 1999). 综上,我们推测晚三叠世扬子板块与华北陆块碰撞后,俯冲大洋板片发生断离,挤压环境向伸展环境转变为该时期幔源岩浆的诱

发和上侵提供了条件,秦岭洋壳沉积物交代的岩石圈地幔楔正是在这样的环境下发生部分熔融,形成了中条山地区晚三叠世富角闪石的堆晶岩.

4.1.3 早白垩世镁铁质侵入岩 早白垩世镁铁质侵入岩较低的 SiO_2 (49.23%~54.99%), 较高的 MgO (4.29%~7.17%) 和过渡金属(如 $\text{Ni}=12.2\times 10^{-6}\sim 96.9\times 10^{-6}$, $\text{Cr}=9.47\times 10^{-6}\sim 290\times 10^{-6}$), 表明其为幔源岩浆产物. 同样,在进行具体的源区示踪之前,我们首先考虑陆壳混染和分离结晶对辉长质侵入岩组成的影响.在微量元素方面,早白垩世侵入岩虽然富集Th、U(相对LREE),但具有稳定的Th/La、U/Nb比值(图11a~11b),表明该“壳源”特征继承于地幔原岩而非侵位过程中的陆壳混染.此外,对于Nb-Ta、Lu-Yb等性质相似的元素,样品($\text{Nb}/\text{Ta}=16\sim 22$, $\text{Lu}/\text{Yb}=0.14\sim 0.16$)具有和地幔($\text{Nb}/\text{Ta}=17.6$, $\text{Lu}/\text{Yb}=0.14\sim 0.15$, Sun and McDonough, 1989; Weyer *et al.*, 2002)相似的比值(图11c~11d),说明样品所代表的岩石继承了初始岩浆的微量元素组成.从同位素的角度,早白垩世镁铁质岩具有均一的Nd同位素组成,其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值随着 SiO_2 的增加基本保持不变,指示岩石经历的陆壳混染有限,其化学组成主要受控于部分熔融或分离结晶(图11e).在La-La/Sm图解(图11f)中,早白垩世镁铁质侵入岩的La/Sm比值随着La含量的增加而增加,指示该期岩石形成过程中未经历明显的分离结晶作用.

早白垩世镁铁质侵入岩显著富集LILEs和LREEs,亏损HFSEs和HREEs(图7c~7d),指示其可能源于交代岩石圈地幔部分熔融.中生代华北克拉通岩石圈地幔的交代介质主要有以下3种:(1)华北陆块拆沉下地壳熔体;(2)俯冲的扬子板块陆壳衍生熔体/流体;(3)俯冲洋壳释放的熔体/流体.在Nb/Yb—Th/Yb图解上(图12a),早白垩世镁铁质岩石样品远离MORB-OIB范围,而与俯冲物质交代的岩石圈地幔部分熔融形成的熔体相当.鉴于Nb和U的地球化学性质在部分熔融过程中相对稳定,岩浆的Nb/U比值可粗略反映源区的Nb/U比值(Hofmann, 1988).早白垩世镁铁质侵入岩的Nb/U介于7.58~22.46,高于俯冲带流体($\text{Nb}/\text{U}\approx 0.22$, Ayers, 1998),低于MORB和OIB($\text{Nb}/\text{U}=47\pm 7$, Hofmann *et al.*, 1986),大致与陆壳的Nb/U变化范围相当(图12b),说明俯冲陆壳衍生熔体/流体可能为该期岩石源区的交代介质.在Rb/Y—Nb/Y和

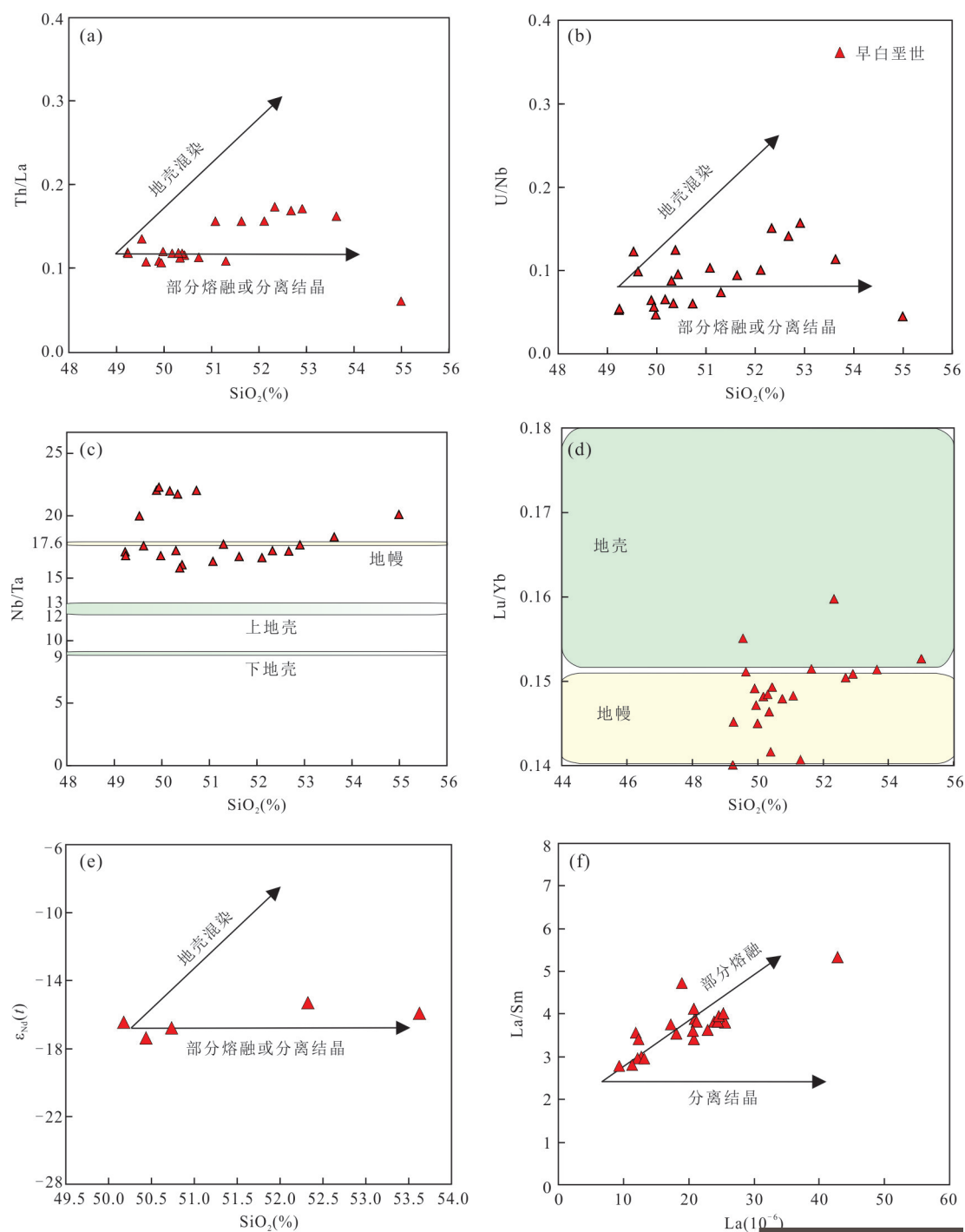


图 11 中条山早白垩世镁铁质岩石 SiO_2 —Th/La 图解(a); SiO_2 —U/Nb 图解(b); SiO_2 —Nb/Ta 图解(c); SiO_2 —Lu/Yb 图解(d); SiO_2 — $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(e); La—La/Sm 图解(f)

Fig.11 Diagrams of SiO_2 vs. Th/La (a), SiO_2 vs. U/Nb (b), SiO_2 vs. Nb/Ta (c), SiO_2 vs. Lu/Yb (d), SiO_2 vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (e) and La vs. La/Sm (f) for the Early Cretaceous mafic rocks in the Zhongtiao Mountain area

图 c 据 Weyer *et al.*, 2002; 图 d 据 Sun and McDonough (1989)

Ba/Th—Th 图解(图 12c~12d)中,样品的投影范围均指示岩石圈地幔的富集与熔体的交代作用相关.综上所述,我们将早白垩世镁铁质侵入岩的源区交代介质归结为俯冲扬子陆壳的衍生熔体(赵子福

等,2015;Zhao *et al.*, 2020).

与华北克拉通东南缘晚中生代幔源岩石相似,中条山早白垩世侵入岩也具有高度富集的 EM II 型 Sr—Nd 同位素组成(图 8a).前者被归结于遭受了俯

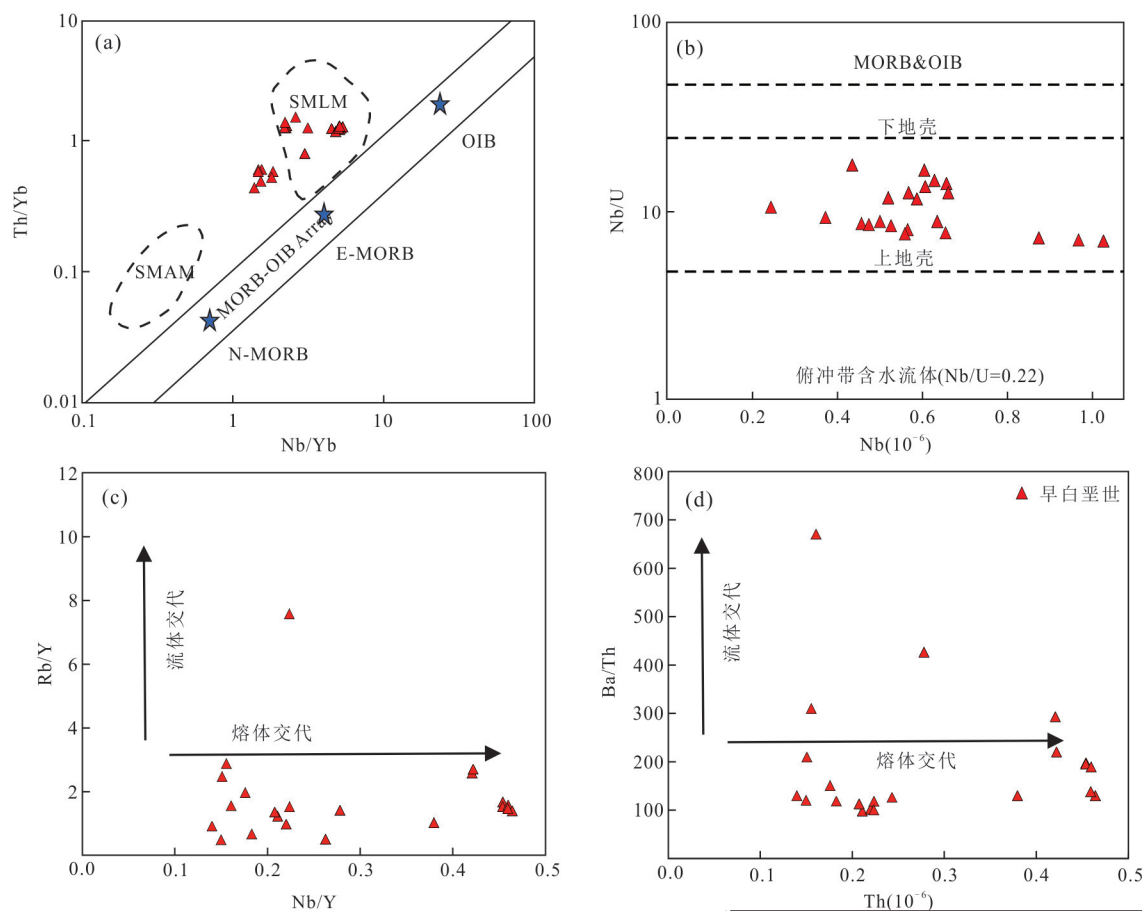


图12 中条山早白垩世镁铁质岩石Nb/Yb—Th/Yb图解(a),Nb—Nb/U图解(b),Nb/Y—Rb/Y图解(c),Th—Ba/Th图解(d)
Fig.12 Diagrams of Nb/Yb vs. Th/Yb (a), Nb vs. Nb/U (b), Nb/Y vs. Rb/Y (c) and Th vs. Ba/Th (d) for the Early Cretaceous mafic rocks of Zhongtiao Mountain area

图a据Liu *et al.*, 2020;图b据Ayers, 1998和Hofmann *et al.*, 1986;图c据Zhao *et al.*, 2020;图d据Zhao *et al.*, 2020. SMLM.俯冲交代岩石圈地幔;SMAM.俯冲交代软流圈地幔;OIB.洋岛玄武岩;N-MORB.正常洋中脊玄武岩;E-MORB.富集洋中脊玄武岩

冲陆壳富硅熔体交代作用的岩石圈地幔部分熔融(Zhang *et al.*, 2002; 汤艳杰等, 2021), 同样的源区形成机制似乎也适用于中条山早白垩世镁铁质侵入岩. 不同之处在于研究区所在的中部造山带南端岩石圈地幔不仅经历了与三叠纪扬子—华北古陆碰撞有关的陆壳俯冲事件, 还经历了与古元古代克拉通东、西陆块拼合事件有关的再循环地壳物质富集事件. 早期富硅熔体的改造于克拉通中部造山带形成了EM I型富集地幔(Xu *et al.*, 2010; 汤艳杰等, 2021), 晚期俯冲陆壳熔体的交代作用则使EM I型地幔进一步演变形成EM II型地幔. 该岩石成因模型也能解释中条山早白垩世镁铁质岩相对于晚三叠世岩石具有更低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(扣除时间累积效应之后). 鉴于EM I型地幔可由中部造山带同期镁铁质岩石中橄榄岩包体(Xu *et al.*, 2010)代表, 我们采用简单的二元混合模型对Sr同位素体系进

行模拟计算, 以评估俯冲的扬子陆壳在EM II型源区形成过程中的贡献. 计算结果表明, >50%的俯冲陆壳参与才能形成中条山早白垩世镁铁质岩浆源区(图10). 因大陆地壳在俯冲隧道深部发生部分熔融过程中以石榴石为残留相, 斜长石几乎全部分解, 所形成的富硅熔体可能具有极高的Sr含量, 从而导致交代地幔源区及其岩浆产物富Sr. 以正常陆壳为混合端元的模拟计算可能过高估计了俯冲陆壳熔体的贡献. 与晚三叠世镁铁质岩一样, 早白垩世岩石的Nd—Hf同位素也发生了一定程度解耦(图8b). 在地幔源区经历的多次地壳物质再循环富集作用中, 其Hf同位素组成可能受到以下3方面因素影响: (1)古元古代俯冲事件中再循环沉积物“锆石效应”所导致的Lu—Hf分馏, (2)三叠纪俯冲陆壳深熔过程中石榴石残留引起的Lu—Hf分馏, (3)地幔源区部分熔融过程中石榴石残留相对Lu的萃取. 其中

过程(2)和(3)将导致岩浆 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 降低;过程(1)控制的 Nd-Hf 同位素解耦方向取决于再循环沉积物类型(成熟度)以及碎屑锆石在俯冲隧道中的溶解性(Dai *et al.*, 2015). 中条山早白垩世镁铁质岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 呈双峰分布(图 8b), 其中负峰值与全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 基本吻合, 显然呈正偏离的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值只能由过程(1)解释. 鉴于古元古代富集事件对早白垩世岩浆活动的影响在时间上是一个远程效应, 我们认为中条山早白垩世镁铁质岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的正漂移部分依然受到少量软流圈新生物质影响.

我们用 Duggen *et al.* (2005) 提出的 K/Yb 与 Dy/Yb 比值(图 13)来约束岩体母岩浆的地幔源区组成和部分熔融程度. 在石榴石稳定域中部分熔融的熔体通常具有较高的 Dy/Yb 值(>2.5), 而尖晶石稳定域中的产生的熔体 Dy/Yb 值相对较低(<1.5). 早白垩世镁铁质岩石的 Dy/Yb 值介于 1.74~2.35, 表明部分熔融可能发生在尖晶石—石榴石稳定域的过渡带(Deng *et al.*, 2017). 地球化学模拟与实验岩石学研究表明上地幔尖晶石—石榴石过渡带的深度约为 75~85 km (Klemme and O'Neill, 2000), 因此, 我们推测早白垩世镁铁质岩石由尖晶石石榴石二辉橄榄岩在 75~85 km 处低程度部分熔融形成.

早白垩世镁铁质侵入岩的形成明显滞后于其地幔源区的形成时间, 这一过程可以用 SARSH (subduction-anatexis-reaction-storage-heating, 即俯冲、深熔、反应、储存和加热, Chen *et al.*, 2014) 模型进行解释: 俯冲板块衍生熔体与上覆岩石圈地幔橄榄岩反应所形成的地幔交代岩能在岩石圈地幔中储存几十至几百个百万年, 直到岩石圈受到拉张作用引起压力降低或者受到软流圈地幔加热发生部分熔融(赵子福等, 2015; 郑永飞等, 2015). 因此我们推测侏罗纪古太平洋板块在华北克拉通岩石圈之下进行低角度俯冲, 之后板块回卷使得克拉通岩石圈地幔与俯冲板块发生脱耦, 软流圈地幔上涌, 导致晚三叠世扬子板块俯冲陆壳衍生熔体交代的地幔橄榄岩发生部分熔融, 形成了早白垩世的镁铁质侵入岩(Wu *et al.*, 2005).

4.2 地质意义

晚三叠世陆—陆碰撞作用导致了大别—苏鲁超高压造山带的形成及相邻地区地壳的加厚(孙金凤和杨进辉, 2013), 榴辉岩包体的发现(许文良等, 2004)证明了这一点. 俯冲大洋板片断离(图 14a)或加厚下地壳榴辉岩化导致下部岩石圈拆沉, 诱发软流圈上涌, 冷却形成新生岩石圈地幔, 金伯利岩中的地幔包体(Yang *et al.*, 2007b)为这一论断提供了

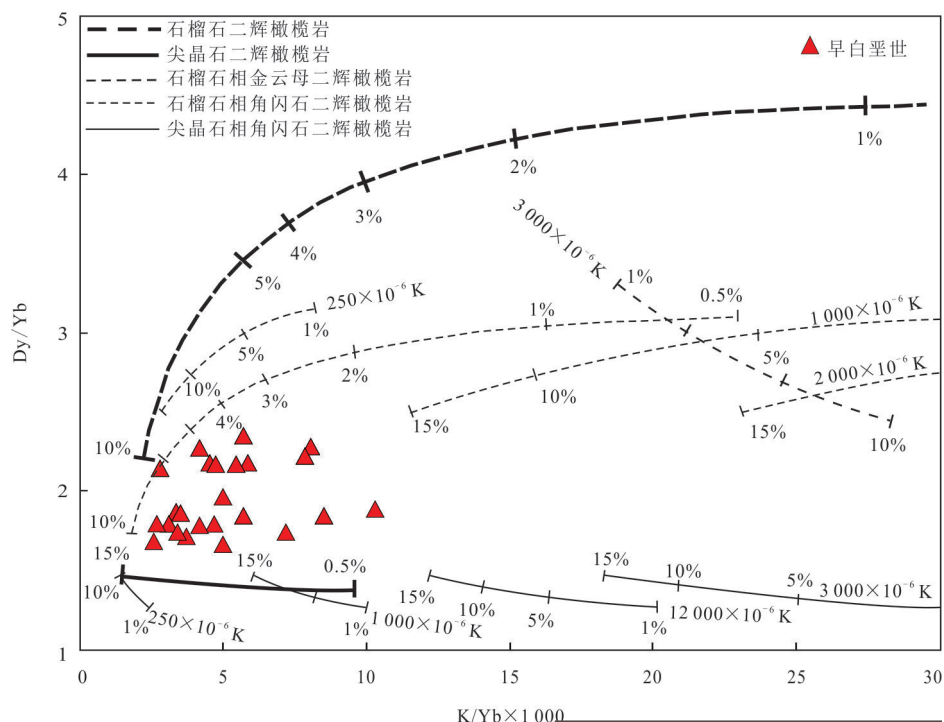
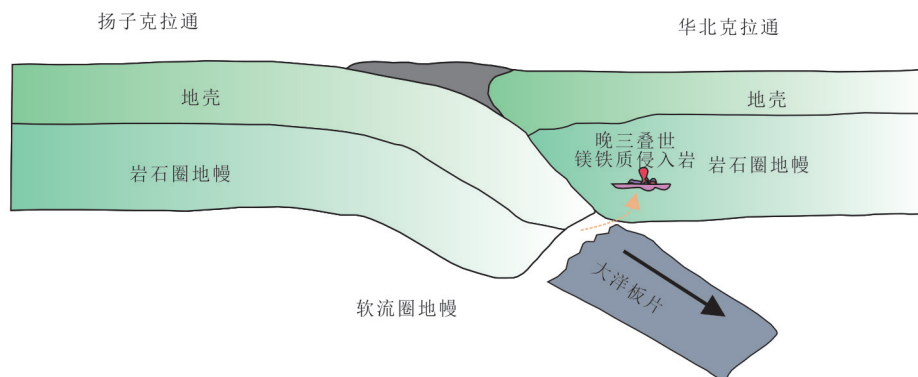


图 13 中条山早白垩世镁铁质岩石 K/Yb × 1 000—Dy/Yb 图解(据 Duggen *et al.*, 2005)

Fig.13 K/Yb × 1 000 vs. Dy/Yb plot of the Early Cretaceous mafic rocks in the Zhongtiao Mountain area

(a) 晚三叠世扬子克拉通向华北克拉通俯冲后古大洋板片断离



(b) 早白垩世古太平洋板块发生回卷导致软流圈充填

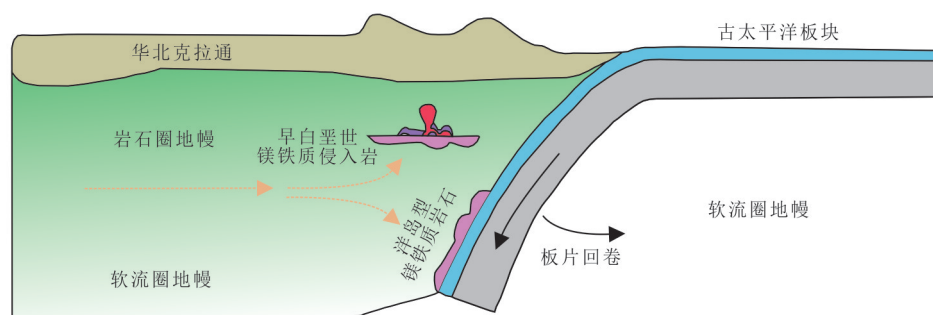


图14 华北克拉通南缘中生代构造演化过程示意图

Fig.14 Schematic cartoons illustrating the Mesozoic tectonic evolution of the southern margin of the North China craton
据 Yang *et al.* (2007a); 郑永飞等 (2018) 修改

依据.在这一过程中,上涌的软流圈减压部分熔融形成具亏损地幔属性的镁铁质岩浆,(拆沉的)岩石圈地幔部分熔融形成富集的镁铁质岩浆,(榴辉岩相)下地壳部分熔融形成长英质岩浆,构成三叠纪复杂的侵入岩(孙金凤和杨进辉,2009,2013),如中条山地区晚三叠世镁铁质侵入岩以及胶东、辽东地区同时代岩浆岩建造(Yang *et al.*, 2007a).前人认为岩石圈减薄的两个标志是软流圈岩浆的出现以及岩浆源区从岩石圈地幔向软流圈地幔的转变(Xu *et al.*, 2009),中条山晚三叠世镁铁质侵入岩出现正的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(图 8b)指示有软流圈物质的介入,说明华北克拉通南缘在该时期经历了一定程度减薄或去克拉通化作用.而同期大部分岩石仍具有负的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值表明晚三叠世扬子板块向华北克拉通的俯冲对白垩纪华北克拉通破坏仅起到“唤醒作用”.

新生代华北克拉通岩石圈地幔在空间上呈现不均一性(汤艳杰等,2021).东部同位素亏损、易熔的岩石圈厚约 60~80 km,中部“上老下新”的岩石圈地幔厚度大于 100 km(上部为残留的古老岩石圈

地幔,下部为经软流圈熔体改造后形成的过渡型地幔),西部古老难熔的岩石圈厚约 200 km.这一东薄西厚的特征与古太平洋板块由东向西的俯冲方向一致,暗示古太平洋板块俯冲可能是导致华北克拉通岩石圈破坏的主要因素.这一过程也在中生代镁铁质岩浆活动中得以体现.前人研究发现镁铁质火成岩在 ~121 Ma 前后具有截然不同的地球化学组成(Yang *et al.*, 2007a; Liu *et al.*, 2008),在此之前前岩石地球化学性质表现为岛弧型微量元素分布型式(富集 LILEs, LREEs 和 Pb, 亏损 HFSEs)以及相对富集的 Sr-Nd 同位素组成,在此之后洋岛型微量元素分布型式(富集 LILEs, LREEs, HFSEs 不亏损)以及相对亏损的 Sr-Nd 同位素组成的镁铁质岩石开始出现(赵子福等,2015,郑永飞等,2018).在侏罗纪期间,古太平洋板块开始向西俯冲,对华北克拉通岩石圈地幔厚度及性质进行改造,但这一时期克拉通大部分地区并未发生明显破坏,存在约 55 Ma (~201~144 Ma)的镁铁质岩浆活动空白期.随着古太平洋板块的回卷(图 14b),软流圈地幔上涌,

导致古老岩石圈地幔橄榄岩部分熔融,形成了早白垩世岛弧型镁铁质岩浆岩(本文),同时经俯冲板片熔/流体交代的软流圈地幔部分熔融形成洋岛型镁铁质岩(闫峻等,2013;Guo *et al.*, 2014),即此时镁铁质岩石的源区既包括古老岩石圈地幔,又包括软流圈地幔,这也对应着 130~110 Ma 变化的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(图 8b)。因此,我们认为早白垩世期间,华北克拉通遭受强烈破坏,其主要控制因素是古太平洋俯冲。

华北克拉通地幔橄榄岩包体的研究表明,中生代单斜辉石具有高 $\text{Mg}^\#(>90)$ 、低 $\text{Al}_2\text{O}_3(<5\%)$ 组成,至新生代转变为低 $\text{Mg}^\#(<90)$ 、高 $\text{Al}_2\text{O}_3(>5\%)$ 特征(Liu *et al.*, 2012)。这一变化与中条山两期镁铁质岩石的地球化学演变相似,表明中生代之前经过多次熔体萃取的典型难熔克拉通型岩石圈地幔在新生代已转化成易熔岩石圈地幔(Princivalle *et al.*, 2014)。晚三叠世镁铁质岩浆岩的出现,指示华北克拉通南缘此时已经发生岩石圈地幔改造,并为后期克拉通破坏创造了条件。早白垩世大规模的岩浆作用、金成矿作用,以及东部大量发育的变质核杂岩和伸展盆地都标志华北克拉通发生了强烈去克拉通化作用。本文对中条山早白垩世镁铁质岩石的研究填补了该时期华北克拉通中部造山带岩浆活动的空白,提供了华北克拉通破坏范围延及中部造山带的例证。

5 结论

(1) 锆石 U-Pb 定年表明,中条山地区镁铁质岩石分别形成于晚三叠世(~217 Ma)和早白垩世(~121 Ma)。

(2) 地球化学数据表明,晚三叠世镁铁质侵入岩主要是堆晶成因,起源于俯冲沉积物衍生的含水熔体交代的难熔地幔楔;早白垩世镁铁质侵入岩来源于被俯冲陆壳衍生熔体交代的富集岩石圈地幔。

(3) 通过中条山地区镁铁质侵入岩的成因研究及其与中生代镁铁质岩浆活动的对比,认为晚三叠世时期受扬子板块和华北克拉通碰撞的影响,克拉通南缘局部发生去克拉通化作用;早白垩世时期受古太平洋板块俯冲作用的控制,华北克拉通破坏达到顶峰,破坏范围可能延及中部造山带。

致谢:中国科学院地质与地球物理研究所张晓晖研究员在野外调研过程中提供了悉心指导与帮助,期刊编辑和审稿人对论文提出了宝贵修改意见,谨致衷心谢忱。

References

- Ayers, J., 1998. Trace Element Modeling of Aqueous Fluid-Peridotite Interaction in the Mantle Wedge of Subduction Zones. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132(4): 390–404. <https://doi.org/10.1007/s004100050431>
- Chen, L., Zhao, Z.F., Zheng, Y.F., 2014. Origin of Andesitic Rocks: Geochemical Constraints from Mesozoic Volcanics in the Luzong Basin, South China. *Lithos*, 190/191: 220–239. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.12.011>
- Dai, L.Q., Zhao, Z.F., Zheng, Y.F., 2015. Tectonic Development from Oceanic Subduction to Continental Collision: Geochemical Evidence from Postcollisional Mafic Rocks in the Hong'an-Dabie Orogens. *Gondwana Research*, 27(3): 1236–1254. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.12.005>
- Deng, J., Liu, X., Wang, Q., et al., 2017. Isotopic Characterization and Petrogenetic Modeling of Early Cretaceous Mafic Diking-Lithospheric Extension in the North China Craton, Eastern Asia. *GSA Bulletin*, 129(11–12): 1379–1407. <https://doi.org/10.1130/b31609.1>
- Ding, L., Ma, C., Li, J., et al., 2016. Geochronological, Geochemical and Mineralogical Constraints on the Petrogenesis of Appinites from the Laoniushan Complex, Eastern Qinling, Central China. *Geochemistry*, 76(4): 579–595. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.10.002>
- Duggen, S., Hoernle, K., van den Bogaard, P., et al., 2005. Post-Collisional Transition from Subduction- to Intraplate-Type Magmatism in the Westernmost Mediterranean: Evidence for Continental-Edge Delamination of Subcontinental Lithosphere. *Journal of Petrology*, 46(6): 1155–1201. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi013>
- Eggins, S.M., Woodhead, J.D., Kinsley, L.P.J., et al., 1997. A Simple Method for the Precise Determination of ≥ 40 Trace Elements in Geological Samples by ICPMS Using Enriched Isotope Internal Standardisation. *Chemical Geology*, 134(4): 311–326. [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00100-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00100-3)
- Gao, S., Rudnick, R., Carlson, R., et al., 2003. Removal of Lithospheric Mantle in the North China Craton: Re-Os Isotopic Evidence for Coupled Crust-Mantle Growth. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 61–67(in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Zhang, J., Xu, W., et al., 2009. Delamination and Destruction of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 54(19): 3367–3378. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0395-9>
- Griffin, W.L., Zhang, A., O'Reilly, S.Y., et al., 1998. Pha-

- nerozoic Evolution of the Lithosphere Beneath the Sino-Korean Craton. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia Geodynamics*, 27: 107–126. <https://doi.org/10.1029/GD027p0107>
- Guo, F., Fan, W., Li, C., et al., 2014. Hf-Nd-O Isotopic Evidence for Melting of Recycled Sediments beneath the Sulu Orogen, North China. *Chemical Geology*, 381: 243–258. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.04.028>
- Halama, R., Marks, M., Brüggmann, G., et al., 2004. Crustal Contamination of Mafic Magmas: Evidence from a Petrological, Geochemical and Sr-Nd-Os-O Isotopic Study of the Proterozoic Isortoq Dike Swarm, South Greenland. *Lithos*, 74(3–4): 199–232. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.004>
- Hirose, K., 1997. Melting Experiments on Lherzolite KLB-1 under Hydrous Conditions and Generation of High-Magnesian Andesitic Melts. *Geology*, 25(1): 42–44. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<0042:MEOLKU>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0042:MEOLKU>2.3.CO;2)
- Hofmann, A.W., 1988. Chemical Differentiation of the Earth: The Relationship between Mantle, Continental Crust, and Oceanic Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297–314. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90132-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90132-X)
- Hofmann, A.W., Jochum, K.P., Seufert, M., et al., 1986. Nb and Pb in Oceanic Basalts: New Constraints on Mantle Evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(1–2): 33–45. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(86\)90038-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)90038-5)
- Holloway, J.R., Burnham, C.W., 1972. Melting Relations of Basalt with Equilibrium Water Pressure less than Total Pressure. *Journal of Petrology*, 13(1): 1–29. <https://doi.org/10.1093/petrology/13.1.1>
- Hong, L., Zhang, Y., Xu, Y., et al., 2017. Hydrous Orthopyroxene-Rich Pyroxenite Source of the Xinkailing High Magnesium Andesites, Western Liaoning: Implications for the Subduction-Modified Lithospheric Mantle and the Destruction Mechanism of the North China Craton. *Lithos*, 282–283: 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.02.014>
- Jiang, C.Y., An, S.Y., 1984. On Chemical Characteristics of Calcic Amphiboles from Igneous Rocks and Their Petrogenesis Significance. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 4(3): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y.H., Jiang, S.Y., Zhao, K.D., et al., 2005. SHRIMP Zircon U-Pb Ages of Lamprophyres in the Liaodong Peninsula and Their Constraints on the Beginning Time of Lithospheric Thinning in Eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 50(19): 2161–2168 (in Chinese).
- Kamber, B.S., Greig, A., Schoenberg, R., et al., 2003. A Refined Solution to Earth's Hidden Niobium: Implications for Evolution of Continental Crust and Mode of Core Formation. *Precambrian Research*, 126(3–4): 289–308. [http://doi.org/10.1016/S0301-9268\(03\)00100-1](http://doi.org/10.1016/S0301-9268(03)00100-1)
- Kelemen, P.B., Hanghøj, K., Greene, A.R., 2007. One View of the Geochemistry of Subduction-Related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust. *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 1–70. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03035-8>
- Klemme, S., O'Neill, H.S., 2000. The Near-Solidus Transition from Garnet Lherzolite to Spinel Lherzolite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 138(3): 237–248. <https://doi.org/10.1007/s004100050560>
- Kusky, T. M., Windley, B. F., Wang, L., et al., 2014. Flat Slab Subduction, Trench Suction, and Craton Destruction: Comparison of the North China, Wyoming, and Brazilian Cratons. *Tectonophysics*, 630: 208–221. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.028>
- Li, B.P., Greig, A., Zhao, J.X., et al., 2005. ICP-MS Trace Element Analysis of Song Dynasty Porcelains from Ding, Jiexiu and Guantai Kilns, North China. *Journal of Archaeological Science*, 32(2): 251–259. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2004.09.004>
- Li, C.F., Chu, Z.Y., Guo, J.H., et al., 2015. A Rapid Single Column Separation Scheme for High Precision Sr-Nd-Pb Isotopic Analysis in Geological Samples Using Thermal Ionization Mass Spectrometry. *Analytical Methods*, 7(11): 4793–4802.
- Li, R., Yang, J.H., Wang, H., et al., 2020. Triassic Lithospheric Modification of the Northern North China Craton: Evidences from the Composite Kalaqin Batholith and Ultramafic-Mafic Heilihe Intrusive Complex in Inner Mongolia. *Lithos*, 362–363: 105501. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105501>
- Li, S.G., Xiao, Y.L., Liou, D.L., et al., 1993. Collision of the North China and Yangtze Blocks and Formation of Coesite-Bearing Eclogites: Timing and Processes. *Chemical Geology*, 109(1/2/3/4): 89–111. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90063-O](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90063-O)
- Li, X.H., Liu, Y., Li, Q.Y., et al., 2009. Precise Determination of Phanerozoic Zircon Pb/Pb Age by Multicollector SIMS without External Standardization. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(4): Q04010. <https://doi.org/10.1029/2009GC002400>
- Liu, X., Fan, H.R., Qiu, Z.J., et al., 2015. Formation Ages of the Jiangxian and Zhongtiao Groups in the Zhongtiao Mountain Region, North China Craton: Insights from SIMS U-Pb Dating on Zircons of Intercalated Pla-

- gioclase Amphibolites. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1564—1572(in Chinese with English abstract).
- Liu, S., Hu, R., Gao, S., et al., 2008. U-Pb Zircon Age, Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopic Constraints on Age and Origin of Alkaline Intrusions and Associated Mafic Dikes from Sulu Orogenic Belt, Eastern China. *Lithos*, 106(3—4): 365—379. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.09.004>
- Liu, S., Hu, R., Gao, S., et al., 2012. Geochemical and Isotopic Constraints on the Age and Origin of Mafic Dikes from Eastern Shandong Province, Eastern North China Craton. *International Geology Review*, 54(12): 1389—1400. <https://doi.org/10.1080/00206814.2011.641732>
- Liu, Y., Wei, J., Zhang, D., et al., 2020. Early Cretaceous Wulong Intermediate-Mafic Diike Swarms in the Liaodong Peninsula: Implications for Rapid Lithospheric Delamination of the North China Craton. *Lithos*, 362—363: 105473. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105473>
- Ma, L., Jiang, S. Y., Hou, M. L., et al., 2014. Geochemistry of Early Cretaceous Calc-Alkaline Lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: Implication for Lithospheric Evolution of the Eastern North China Craton. *Gondwana Research*, 25(2): 859—872. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.05.012>
- Ma, X., Chen, B., Niu, X. L., 2009. Genesis of the Late Paleozoic Dongwanzi Pluton, Eastern Hebei. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1975—1988(in Chinese with English abstract).
- Middlemost, E., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3—4): 215—224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Paton, C., Woodhead, J. D., Hellstrom, J. C., et al., 2010. Improved Laser Ablation U-Pb Zircon Geochronology through Robust Downhole Fractionation Correction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(3): Q0AA06. <https://doi.org/10.1029/2009GC002618>
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1):63—81.
- Pei, F. P., Xu, W. L., Wang, Q. H., et al., 2004. Mesozoic Basalt and Mineral Chemistry of the Mantle-Derived Xenocrysts in Feixian, Western Shandong, China: Constraints on Nature of Mesozoic Lithospheric Mantle. *Geological Journal of China Universities*, 10(1): 88—97 (in Chinese with English abstract).
- Polat, A., Hofmann, A. W., Rosing, M. T., 2002. Boninite-Like Volcanic Rocks in the 3.7—3.8 Ga Isua Greenstone Belt, West Greenland: Geochemical Evidence for Intra-Oceanic Subduction Zone Processes in the Early Earth. *Chemical Geology*, 184(3/4): 231—254. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00363-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00363-1)
- Princivalle, F., De Min, A., Lenaz, D., et al., 2014. Ultramafic Xenoliths from Damaping (Hannuoba Region, NE China): Petrogenetic Implications from Crystal Chemistry of Pyroxenes, Olivine and Cr-Spinel and Trace Element Content of Clinopyroxene. *Lithos*, 188: 3—14. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.10.013>
- Quan, Y. K., Yang, D. B., Mu, M. S., et al., 2020. Tectonic Evolution of the Northeastern North China Craton: Constraints from Geochronology and Sr-Nd-Hf-O Isotopic Data from Late Triassic Intrusive Rocks on Liaodong Peninsula, NE China. *Lithos*, 362—363: 105489. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105489>
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>
- Shao, J. A., Han, Q. J., Zhang, L. Q., et al., 1999. Two Kinds of Vertical Accretion of the Continental Crust: An Example of the Da Hinggan Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4): 600—606(in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Tian, W., Zhang, J. H., 2015. Early Permian Cumulates in Northern Margin of North China Craton and Their Tectonic Significances. *Earth Science*, 40(9): 1441—1457(in Chinese with English abstract).
- Sisson, T. W., Grove, T. L., 1993. Experimental Investigations of the Role of H₂O in Calc-Alkaline Differentiation and Subduction Zone Magmatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(2): 143—166. <https://doi.org/10.1007/BF00283225>
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D. J., et al., 2008. Plešovice Zircon: A New Natural Reference Material for U-Pb and Hf Isotopic Microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1): 1—35. <http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>
- 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.
- Sun, J. F., Yang, J. H., 2009. Early Cretaceous A-Type Granites in the Eastern North China Block with Relation to Destruction of the Craton. *Earth Science*, 34(1): 137—147(in Chinese with English abstract).
- Sun, J. F., Yang, J. H., 2013. Mesozoic Magmatism Related to Decratonization of the North China Craton. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(5): 577—592(in Chinese with English abstract).
- Tang, Y. J., Ying, J. F., Zhao, Y. P., et al., 2021. Nature and Secular Evolution of the Lithospheric Mantle beneath the North China Craton. *Science China Earth Sciences*.

- <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9737-4> (in Chinese)
- Wang, W., Xu, W.L., Ji, W.Q., et al., 2006. Late Mesozoic and Paleogene Basalts and Deep-Derived Xenocrysts in Eastern Liaoning Province, China: Constraints on Nature of Lithospheric Mantle. *Geological Journal of China Universities*, 12(1): 30–40(in Chinese with English abstract).
- Weyer, S., Münker, C., Rehkämper, M., et al., 2002. Determination of Ultra-Low Nb, Ta, Zr and Hf Concentrations and the Chondritic Zr/Hf and Nb/Ta Ratios by Isotope Dilution Analyses with Multiple Collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 187(3): 295–313. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00129-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00129-8)
- Wu, F., Lin, J., Wilde, S., et al., 2005. Nature and Significance of the Early Cretaceous Giant Igneous Event in Eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1–2): 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.019>
- Xu, W., Yang, D., Shan, G., et al., 2010. Geochemistry of Peridotite Xenoliths in Early Cretaceous High-Mg[#] Diorites from the Central Orogenic Block of the North China Craton: The Nature of Mesozoic Lithospheric Mantle and Constraints on Lithospheric Thinning. *Chemical Geology*, 270(1–4): 257–273. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.12.006>
- Xu, W.L., Wang, Q.H., Wang, D.Y., et al., 2004. Mesozoic Lithospheric Thinning Process and Mechanism in the Eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic Igneous Rocks and Deep-Source Xenoliths. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 9(in Chinese with English abstract).
- Xu, Y.G., Li, H.Y., Pang, C.J., et al., 2009. On the Timing and Duration of the Destruction of the North China Craton. *Science Bulletin*, 54(19): 3379–3396. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0346-5>
- Yan, J., Chen, J.F., Xie, Z., et al., 2003. Slow-Source Xenoliths in Late Cretaceous Basalts in Eastern Shandong: New Evidence for Time Constraints on Lithospheric Thinning in Eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1570–1574(in Chinese).
- Yan, Q.R., Wang, Z.Q., Yan, Z., et al., 2007. SHRIMP Analyses for Ophiolitic-Mafic Blocks in the Kangxian-Mianxian Section of the Mianxian-Lueyang Melange: Their Geological Implications. *Geological Review*, 53(6): 755–764(in Chinese with English abstract).
- Yang, H.T., Yang, D.B., Mu, M.S., et al., 2019. Sr-Nd-Hf Isotopic Compositions of Lamprophyres in Western Shandong, China: Implications for the Nature of the Early Cretaceous Lithospheric Mantle beneath the Eastern North China Craton. *Lithos*, 336–337: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.030>
- Yang, J.H., Sun, J.F., Chen, F., et al., 2007a. Sources and Petrogenesis of Late Triassic Dolerite Dikes in the Liaodong Peninsula: Implications for Post-Collisional Lithosphere Thinning of the Eastern North China Craton. *Journal of Petrology*, 48(10): 1973–1997. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm046>
- Yang, J.H., Wu, F.Y., Wilde, S.A., et al., 2007b. Petrogenesis of Late Triassic Granitoids and Their Enclaves with Implications for Post-Collisional Lithospheric Thinning of the Liaodong Peninsula, North China Craton. *Chemical Geology*, 242(1–2): 155–175. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.03.007>
- Zhang, H.F., Min, S., Zhou, X.H., et al., 2002. Mesozoic Lithosphere Destruction beneath the North China Craton: Evidence from Major-, Trace-Element and Sr-Nd-Pb Isotope Studies of Fangcheng Basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(2): 241–254. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0395-0>
- Zhang, H.F., Ying, J.F., Xu, P., et al., 2004. Mantle Olivine Xenoliths from Mesozoic Basalts in North China: Implications for Lithospheric Mantle Replacement Processes. *Chinese Science Bulletin*, 49(8): 784–789(in Chinese).
- Zhang, S.H., Zhao, Y., Davis, G.A., et al., 2014. Temporal and Spatial Variations of Mesozoic Magmatism and Deformation in the North China Craton: Implications for Lithospheric Thinning and Decratonization. *Earth-Science Reviews*, 131: 49–87. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.12.004>
- Zhao, G.C., Cawood, P.A., Wilde, S.A., et al., 2000. Metamorphism of Basement Rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 103(1/2): 55–88. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(00\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(00)00076-0)
- Zhao, B., Wang, D.H., Hou, K.J., et al., 2012. Isochronology Study on Sushui Complex in Zhongtiao Mountains and Its Geological Significance. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 34(1): 1–8(in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Liang, S., Santosh, M., et al., 2020. Lithospheric Extension Associated with Slab Rollback: Insights from Early Cretaceous Magmatism in the Southern Segment of Tan-Lu Fault Zone, Central-Eastern China. *Lithos*, 362–363. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105487>
- Zhao, Z.F., Dai, L.Q., Zheng, Y.F., 2015. Two Types of the Crust-Mantle Interaction in Continental Subduction Zones. *Scientia Sinica (Terrae)*, 58(8): 1269–1283 (in

Chinese).

- Zheng, Y. F., Xu, Z., Zhao, Z. F., et al., 2018. Mesozoic Mafic Magmatism in North China: Implications for Thinning and Destruction of Cratonic Lithosphere. *Science China Earth Sciences*, 61(4):353–385(in Chinese).
- Zheng, J. P., Lu, F. X., Griffin, W., et al., 2006. Lithospheric Thinning Accompanying Mantle Lateral Spreading, Erosion and Replacement beneath the Eastern Part of North China: Evidence from Peridotites. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 76–85(in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., Dai, H. K., 2018. Mantle Replacement in Eastern North China Caused by Plate Subduction and Retracement in the Western Pacific, Resulting in Intracontinental Basin–Mountain Coupling. *Science China Earth Sciences*, 48: 436–456(in Chinese).
- Zheng, T., Zhao, L., Zhu, R. X., 2009. New Evidence from Seismic Imaging for Subduction during Assembly of the North China Craton. *Geology*, 37(5): 395–398. <https://doi.org/10.1130/g25600a.1>
- Zheng, Y. F., Chen, Y. X., Dai, L. Q., et al., 2015. Developing Plate Tectonics Theory from Oceanic Subduction Zones to Collisional Orogens. *Scientia Sinica (Terrae)*, 45(6): 711–735(in Chinese).
- Zheng, Y. F., Wu, F. Y., 2009. Growth and Reworking of Cratonic Lithosphere. *Chinese Science Bulletin*, 54(14): 1945–1949(in Chinese).
- Zheng, Y. F., Xu, Z., Zhao, Z. F., et al., 2018. Mesozoic Mafic Magmatism and Craton Thinning and Destruction in North China. *Science China Earth Sciences*, 48: 379–414(in Chinese).

附中文参考文献

- 高山, Rudnick, R. L., Carlson, R. W., et al., 2003. 华北克拉通岩石圈地幔置换作用和壳幔生长耦合的 Re–Os 同位素证据. *地学前缘*, 10(3): 61–67.
- 姜常义, 安三元, 1984. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义. *矿物岩石*, 4(3): 1–9.
- 姜耀辉, 蒋少涌, 赵葵东, 等, 2005. 辽东半岛煌斑岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄及其对中国东部岩石圈减薄开始时间的制约. *科学通报*, 50(19): 2161–2168.
- 刘玄, 范宏瑞, 邱正杰, 等, 2015. 中条山地区绛县群和中条群沉积时限: 夹层斜长角闪岩 SIMS 锆石 U–Pb 年代学证据. *岩石学报*, 31(6): 1564–1572.
- 马旭, 陈斌, 牛晓露, 2009. 冀东晚古生代东湾子岩体的岩石成因研究. *岩石学报*, 25(8): 1975–1988.
- 裴福萍, 许文良, 王清海, 等, 2004. 鲁西费县中生代玄武岩及幔源捕虏晶的矿物化学: 对岩石圈地幔性质的制约. 高

校地质学报, 10(1): 88–97.

- 邵济安, 韩庆军, 张履桥, 等, 1999. 陆壳垂向增生的两种方式: 以大兴安岭为例. *岩石学报*, 15(4): 600–606.
- 邵济安, 田伟, 张吉衡, 2015. 华北克拉通北缘早二叠世堆晶岩及其构造意义. *地球科学*, 40(9): 1441–1457.
- 孙金凤, 杨进辉, 2009. 华北东部早白垩世 A 型花岗岩与克拉通破坏. *地球科学*, 34(1): 137–147.
- 孙金凤, 杨进辉, 2013. 华北中生代岩浆作用与去克拉通化. *岩石矿物学杂志*, 32(5): 577–592.
- 汤艳杰, 英基丰, 赵月鹏, 等, 2021. 华北克拉通岩石圈地幔特征与演化过程. *中国科学: 地球科学*, <https://doi.org/10.1360/SSTe-2020-0303>
- 王微, 许文良, 纪伟强, 等, 2006. 辽东中生代晚期和古近纪玄武岩及深源捕虏晶: 对岩石圈地幔性质的制约. *高校地质学报*, 12(1): 30–40.
- 许文良, 王清海, 王冬艳, 等, 2004. 华北克拉通东部中生代岩石圈减薄的过程与机制: 中生代火成岩和深源捕虏体证据. *地学前缘*, 11(3): 9.
- 闫峻, 陈江峰, 谢智, 等, 2003. 鲁东晚白垩世玄武岩中的幔源捕虏体: 对中国东部岩石圈减薄时间制约的新证据. *科学通报*, 48(14): 1570–1574.
- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 等, 2007. 秦岭勉略构造混杂带康县: 勉县段蛇绿岩块—铁镁质岩块的 SHRIMP 年代及其意义. *地质论评*, 53(6): 755–764.
- 张宏福, 英基丰, 徐平, 等, 2004. 华北中生代玄武岩中地幔橄榄石捕虏晶: 对岩石圈地幔置换过程的启示. *科学通报*, 49(8): 784–789.
- 赵斌, 王登红, 侯可军, 等, 2012. 中条山涑水杂岩的同位素年代学研究及其地质意义. *地球科学与环境学报*, 34(1): 1–8.
- 赵子福, 戴立群, 郑永飞, 2015. 大陆俯冲带两类壳幔相互作用. *中国科学: 地球科学*, 45(7): 900–915.
- 郑建平, 路凤香, Griffin, W. L., 等, 2006. 华北东部橄榄岩与岩石圈减薄中的地幔伸展和侵蚀置换作用. *地学前缘*, 13(2): 76–85.
- 郑建平, 戴宏坤, 2018. 西太平洋板片俯冲与后撤引起华北东部地幔置换并导致陆内盆—山耦合. *中国科学: 地球科学*, 48: 436–456.
- 郑永飞, 陈伊翔, 戴立群, 等, 2015. 发展板块构造理论: 从洋壳俯冲带到碰撞造山带. *中国科学: 地球科学*, 45(6): 711–735.
- 郑永飞, 吴福元, 2009. 克拉通岩石圈的生长和再造. *科学通报*, 54(14): 1945–1949.
- 郑永飞, 徐峥, 赵子福, 等, 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏. *中国科学: 地球科学*, 48: 379–414.