

https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.195



# 华北东部中生代高 Mg<sup>#</sup>闪长岩与壳幔相互作用

辛梦荷<sup>1</sup>, 汪浪<sup>1</sup>, 刘传朋<sup>2</sup>, 汪翔<sup>1</sup>, 郑怡欣<sup>1</sup>, 宗克清<sup>1</sup>, 郭京梁<sup>1</sup>, 汪在聪<sup>1\*</sup>

1. 中国地质大学地球与行星科学学院地质过程与成矿预测全国重点实验室, 湖北武汉 430074
2. 山东省地质矿产勘查开发局第五地质大队(山东省第五地质矿产勘查院), 山东泰安 271000

**摘要:** 华北东部在中生代时期发生了强烈的克拉通破坏, 并伴随构造-岩浆-成矿活动。在破坏峰期, 鲁西-徐淮-大别等地区广泛发育了与同期铁铜金等多种金属成矿有关的高 Mg<sup>#</sup>闪长岩。尽管岩石成因已有大量研究, 但是其空间分布规律与岩石圈演化之间的联系仍缺乏系统认识。选取华北东部为研究区, 系统梳理总结了高 Mg<sup>#</sup>闪长岩的岩相学、时空分布规律、Sr-Nd-Pb 同位素特征, 构建了大区域尺度纵向空间上的联系, 探讨壳幔相互作用中岩石圈的演化过程, 为研究区成岩成矿作用以及空间差异性提供重要基础。这些高 Mg<sup>#</sup>闪长岩具有一致的岛弧型微量元素特征及富集的 Sr-Nd 同位素特征, 表明源区存在再循环地壳物质。而且, Sr-Nd-Pb 同位素存在空间的显著变化: 自南向北, 闪长岩 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 逐渐降低 (0.7117~0.7043), ε<sub>Nd</sub>(t) 逐渐升高 (-24.90~-1.77), 表明了壳源物质对岩石圈地幔改造的程度从南到北逐渐减弱的趋势, 支持三叠纪时期扬子大陆板块的俯冲对华北地幔的影响。另一方面, 低 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 闪长岩具有低的 (<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>i</sub> 和 (<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>i</sub>, 与华北古老变质基底相似的 Pb 同位素, 说明源区还存在华北古老地壳物质, 可能与地壳拆沉有关。因此, 高 Mg<sup>#</sup>闪长岩反映出华北东部岩石圈地幔自南向北受再循环物质(扬子地壳)改造程度逐渐减弱并伴随华北地壳拆沉, 以及俯冲的扬子地壳和拆沉的华北古老地壳物质对地幔性质改造的不同程度贡献。这也为更好的理解高 Mg<sup>#</sup>闪长岩的形成、演化以及矿床的种类和分布规律提供了重要基础。

**关键词:** 华北克拉通; 高 Mg<sup>#</sup>闪长岩; 中生代; 壳幔相互作用; 成矿。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2026)02-527-20

收稿日期: 2025-08-23

## North China Eastern Mesozoic High Mg<sup>#</sup> Diorites and Crust-Mantle Interaction

Xin Menghe<sup>1</sup>, Wang Lang<sup>1</sup>, Liu Chuanpeng<sup>2</sup>, Wang Xiang<sup>1</sup>, Zheng Yixin<sup>1</sup>, Zong Keqing<sup>1</sup>, Guo Jingliang<sup>1</sup>, Wang Zaicong<sup>1\*</sup>

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth and Planetary Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources No.5 Geological Brigade(No.5 Institute of Geology and Mineral Exploration of Shandong Province), Taian 271000, China

**Abstract:** Intense cratonic destruction occurred in the eastern part of the North China Craton(NCC) during the Mesozoic, accompanied by tectonic-magmatic-metallogenic activities. During the peak period of destruction, high Mg<sup>#</sup> diorites related to the coeval Fe-Cu-Au deposits were widely distributed in regions like Luxi-Xuhuai-Dabie. Although there have been many studies on the genesis of rocks, the connection between the spatial distributions of high Mg<sup>#</sup> diorites and the evolution of the lithosphere still

**基金项目:** 国家重点研究发展计划(No.2023YFF0804200); 国家自然科学基金项目(No. 42273023); 中国地质大学武汉教学实验室开放基金(No. SKJ2024001); 深地国家科技重大专项(No. 2025ZD1007202), 受五矿勘查开发有限公司科技专项(No. WKKC-2024-YF01).

**作者简介:** 辛梦荷(2000-), 女, 硕士研究生, 地球化学专业. ORCID: 0009-0006-6557-8382. E-mail: xinmenghe@163.com

\* **通讯作者:** 汪在聪, ORCID: 0000-0002-3584-1673. E-mail: zaicongwang@cug.edu.cn

**引用格式:** 辛梦荷, 汪浪, 刘传朋, 汪翔, 郑怡欣, 宗克清, 郭京梁, 汪在聪, 2026. 华北东部中生代高 Mg<sup>#</sup>闪长岩与壳幔相互作用. 地球科学, 51(2): 527-546.

**Citation:** Xin Menghe, Wang Lang, Liu Chuanpeng, Wang Xiang, Zheng Yixin, Zong Keqing, Guo Jingliang, Wang Zaicong, 2026. North China Eastern Mesozoic High Mg<sup>#</sup> Diorites and Crust-Mantle Interaction. *Earth Science*, 51(2): 527-546.

lacks systematic understanding. This paper selects the eastern part of the NCC as the study area. It comprehensively sorts out and summarizes the petrography, temporal and spatial distribution patterns, and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of high Mg<sup>#</sup> diorites, establishes the vertical connection on a large regional scale, and explores the evolution process of the lithosphere in the crust-mantle interaction, providing an important basis for magmatic and mineralization processes as well as spatial differences. These high Mg<sup>#</sup> diorites have consistent island arc-like trace element characteristics and enriched Sr-Nd isotope compositions, indicating the existence of recycled crustal materials in the source region. Moreover, there are significant spatial variations in the Sr-Nd-Pb isotopes: from south to north, the (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> of diorites gradually decreased (0.711 7~0.704 3), and the ε<sub>Nd</sub>(*t*) gradually increased (-24.90~-1.77), indicating a trend of decreasing influence of crustal materials on the mantle from south to north, which supports the influence of the subduction of the Yangtze continental Plate during the Triassic on the lithospheric mantle beneath the NCC. On the other hand, the low (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> diorites have low (<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>i</sub> and (<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>i</sub> like those of the ancient metamorphic basement of the NCC, indicating that there are also ancient NCC crustal materials in the source, which may be related to the lower crust delamination. Therefore, the high Mg<sup>#</sup> diorites reflect that the degree of modification of the lithospheric mantle from south to north by recycled materials (Yangtze crust) gradually weakens, accompanied by the crustal delamination beneath the eastern NCC, and the relative contributions of the subducting Yangtze crust and the NCC ancient crust. This also promotes a better understanding of the formation and evolution of high Mg<sup>#</sup> diorites, as well as the types and distribution patterns of deposits.

**Key words:** NCC; high-Mg<sup>#</sup> diorite; Mesozoic; crust-mantle interaction; mineralization.

## 0 引言

华北克拉通在中生代发生了剧烈减薄与破坏, 早白垩世达到克拉通破坏峰期, 并伴随大规模的岩浆作用以及爆发性金(一铜一铁)成矿活动(Wu *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2021). 因此, 华北地区成为研究克拉通破坏与成矿的热点区域. 古生代以来, 华北克拉通经历了多期次的板块俯冲改造事件, 主要包括北部古太平洋板块的俯冲碰撞、南部扬子板块与华北板块的陆陆碰撞等事件(赵子福和郑永飞, 2009; Zhu *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2021). 在周围板块的挤压碰撞作用下, 岩石圈地幔经历了多期次不同来源俯冲物质的交代改造, 其物理化学性质产生显著变化而诱发大规模的地壳拆沉(Gao *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2018; Lan *et al.*, 2019). 这也导致岩石圈发生剧烈减薄, 对华北克拉通的构造格局产生了深远的影响(巫祥阳等, 2003; 田忠华等, 2022). 基于此构造背景, 华北东部发育有大量的与多金属矿床紧密伴生的高 Mg<sup>#</sup> 闪长质岩石(Yang *et al.*, 2003; Jin *et al.*, 2015; 郭军等, 2023), 这些岩石成为研究中生代岩浆与成矿作用的理想对象.

高 Mg<sup>#</sup> 闪长岩具有高 Mg<sup>#</sup>、Cr、Ni 含量, 富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土(LREE), 亏损高场强元素(HFSE)以及 Y, 高 Sr/Y 等特点. 然而, 对于这种特别的地球化学特征成因仍未有统一的认识, 主要的争论在于其不同的岩石成因, 主要包括:(1) 拆沉下地壳来源的熔体在上升的过程中与地幔橄

榄岩相互作用(Gao *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2006a; Xu *et al.*, 2008); (2) 俯冲大洋板片的部分熔融(Wu *et al.*, 2023); (3) 加厚下地壳部分熔融(Ather-ton and Petford, 1993); (4) 交代岩石圈地幔来源(宋明春等, 2020); (5) 基性岩浆与酸性岩浆的混合(Zhang *et al.*, 2013; 陈斌等, 2013); (6) 幔源岩浆的分离结晶等模式(Yang *et al.*, 2012). 尽管高 Mg<sup>#</sup> 闪长岩具有复杂的岩石成因, 但是这类岩石记录了地幔以及地壳物质的信息, 为我们研究壳幔相互作用提供了绝佳载体. 除此之外, 全球尺度下, 该类岩石还与大型斑岩型 Cu-Au 矿床的形成密切相关, 也是建立壳幔相互作用与金属成矿联系的重要纽带.

华北东部地区沿跨岩石圈尺度的郯庐断裂带分布了大量同期(130~120 Ma)高 Mg<sup>#</sup> 闪长质岩石. 这些闪长岩高 Mg<sup>#</sup>、Cr、Ni 含量以及其中含有大量的地幔包体指示源区较深, 可能来源于地幔(Xu *et al.*, 2006b, 2009). 结合它们的岛弧型微量元素和放射性的 Sr-Nd 同位素组成, 认为其地幔来源受到强烈交代. 此外, 通过研究发现 Sr-Nd 同位素存在空间的显著变化: 自南向北, 闪长岩的 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 值逐渐降低(0.711 7~0.704 3), ε<sub>Nd</sub>(*t*) 值逐渐升高(-24.90~-1.77), 进一步证明地幔不均一特征. 与高 Mg<sup>#</sup> 闪长岩同期且伴生的矿床主要包括铁铜金等多金属矿产, 但是其成矿规模与分布存在一定的差异性. 从东南到西北, 矿床类型大体上从 Cu-Au 矿向 Fe 矿转变. 造成上述差异性的原因目前尚不清楚. 以往的研究焦点主要集中在华北东部地区的

金成矿研究,对矿床的成矿年代、矿床地质、成矿过程等研究较为深入,但是对于自北向南,闪长质岩石分布和Sr-Nd同位素的空间变化、Pb同位素特征与克拉通岩石圈演化之间的联系,以及对金属差异性成矿的影响研究仍存在不足.本文选取华北东部中生代(鲁西—徐淮—大别地区)高Mg<sup>#</sup>闪长岩作为研究对象,根据新获取的部分地区数据,结合该区域已经发表的大量数据,通过对岩相及主微量元素、同位素数据等进行系统的梳理,理解高Mg<sup>#</sup>闪长岩的特征、形成及分布,为限定华北东部壳幔岩浆过程与岩石圈演化及其对成矿的意义提供了基础.

## 1 华北东部中生代闪长岩时空分布

### 1.1 高Mg<sup>#</sup>闪长岩的地球化学特征

高Mg<sup>#</sup>闪长岩是中国东部广泛出露的一种岩石,是一种特殊类型的中性侵入岩,属于闪长岩类,通常具有富Mg<sup>#</sup>的特征[ $\omega(\text{MgO}) > 4\%$ ;  $\text{Mg}^{\#} > 45$ ],常形成于特殊的构造背景下,例如俯冲板块断离、加厚或拆沉的下地壳以及陆陆碰撞带等构造背景(Xu *et al.*, 2008; Gu *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2023).对于揭示岩石圈壳幔相互作用与构造演化具有特殊的指示意义(白兴卫等, 2024).高Mg<sup>#</sup>闪长岩的主要矿物组成为斜长石、角闪石、少量的黑云母、辉石,副矿物有磁铁矿、榍石、磷灰石等(Huang *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2012; Jia *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2024).高Mg<sup>#</sup>闪长岩的地球化学特征可以反映其形成时的地质条件.它通常具有高Mg<sup>#</sup>、高Sr/Y、Cr、Ni含量,轻重稀土显著分异且亏损HFSE以及具有富集的Sr-Nd同位素组成(Huang *et al.*, 2008; Guo *et al.*, 2024).从地球化学特征可以看出,高Mg<sup>#</sup>、Cr、Ni含量能够反映幔源岩浆的特征,放射性同位素则显示出壳源物质的性质.高Mg<sup>#</sup>闪长岩同时具有幔源和壳源物质的特性表明其岩石成因可能与壳幔相互作用有关.

### 1.2 高Mg<sup>#</sup>闪长岩的时空分布

整个华北东部在中生代时期岩浆活动广泛而强烈,形成了大量岩性不同的侵入岩与火山岩,该时期也是华北从挤压向伸展构造变化转折的峰期(翟明国等, 2003).学者们认为华北东部中生代构造—岩浆—成矿事件可能是由扬子板块的俯冲碰撞和古太平洋板块俯冲所致(赵子福和郑永飞, 2009; Zhu *et al.*, 2012; 李三忠等, 2018; Wu *et al.*, 2019).这些事件导致了在强烈的伸展构造背景

下,华北克拉通岩石圈地幔物理和化学性质的转变,同时形成了高Mg<sup>#</sup>闪长岩及同期的基性岩脉(Li *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020).

高Mg<sup>#</sup>闪长岩的分布具有一定的时空规律,这与当时的地球动力学背景密切相关.中生代时期高Mg<sup>#</sup>闪长岩的分布主要受控于当时的岩浆—构造活动,主要包括侏罗世和早白垩世两期,其中以早白垩世的岩浆活动最为剧烈.区内侏罗世岩浆岩零星分布,主要为平邑地区的铜石闪长岩,徐淮地区少量分布,岩性以中酸性侵入体为主(胡华斌等, 2004; Xu *et al.*, 2004b; Lan *et al.*, 2012).而早白垩世岩浆岩在空间上分布非常广,岩石类型也十分复杂,不仅包括各种类型的中生代侵入岩,还发育了一套高Mg<sup>#</sup>闪长质岩石(图1),从华北东部地区自西北向东南主要包括鲁西北部济南—邹平—淄博金岭等地区的辉长闪长岩—闪长岩(Xu *et al.*, 2004b; Huang *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2018; Guo *et al.*, 2023);南部的莱芜矿山—金牛山—角峪—沂南铜井等地区的闪长岩—辉长闪长岩(许文良等, 2004; Xu *et al.*, 2004b; 王永等, 2011; Lan *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2023);徐淮地区的班井—利国—夹沟等地区的闪长岩(Xu *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2006a; Zhang *et al.*, 2017; 产思维等, 2022)以及大别梅川—刘家洼—赤土岭等地区的闪长岩(赵子福和郑永飞, 2009; Jia *et al.*, 2016).鲁西地区从西北向东南,岩体岩性逐渐变化,大体上由基性岩向中酸性岩过渡.除了上述空间上的变化,同位素年代学显示,早白垩世时期华北克拉通东部岩浆岩时代自西向东具有逐渐变年轻的趋势(杨进辉等, 2021).

### 1.3 典型岩体的地质特征

华北东部在多期次的俯冲碰撞的背景下形成了一系列典型的闪长质岩体,包括鲁西—徐淮—大别地区的邹平岩体、金岭岩体、铁铜沟岩体、班井岩体、利国岩体、夹沟岩体以及刘家洼岩体等,年龄集中在早白垩世(125~135 Ma)(图2).同时,这些岩体也与同期多类型Fe-Cu-Au多金属矿床存在紧密的时空联系.

鲁西地区典型岩体为邹平岩体、金岭岩体和铁铜沟岩体,3种岩体均为杂岩体,依次分布于邹平县以南、淄博市东北部以及莱芜东南颜庄一带.岩体主要受到断裂及褶皱构造的控制,呈岩墙或岩株产出(杨青亮, 2013).主体为钙碱性系列的闪长质岩

表 1 华北克拉通东部矿床类型及相关岩体  
Table 1 Types of deposits and related rock bodies in the eastern part of the NCC

| 区域 | 地区 | 岩体  | 岩性     | 侵位年龄(Ma)  | 矿床类型     | 文献                         |
|----|----|-----|--------|-----------|----------|----------------------------|
| 鲁西 | 淄博 | 金岭  | 黑云母闪长岩 | 130±1     | Fe       | 张超等(2017)                  |
|    | 淄博 | 金岭  | 黑云母闪长岩 | 126±1.5   | Fe       | Jin <i>et al.</i> (2015)   |
|    | 淄博 | 金岭  | 辉长闪长岩  | 131.6±0.8 | Fe       | Lan <i>et al.</i> (2019)   |
|    | 莱芜 | 矿山  | 辉石闪长岩  | 131±1     | Fe       | 高明波等(2022)                 |
|    | 沂南 | 铜井  | 闪长岩    | 129±1     | Au-Cu    | 王永等(2011)                  |
|    | 平邑 | 铜石  | 闪长岩    | 165±6     | Au-Cu    | 郭谱(2014)                   |
| 徐淮 | 徐淮 | 利国  | 闪长岩    | 131.4±1.5 | Fe-Cu-Au | Zhang <i>et al.</i> (2017) |
|    | 徐淮 | 班井  | 闪长岩    | 127±1     | Cu-Au    | Xu <i>et al.</i> (2009)    |
| 大别 | 安徽 | 刘家洼 | 闪长岩    | 127.3±2   | /        | Zhang <i>et al.</i> (2013) |
|    | 安徽 | 赤土岭 | 闪长岩    | 131±3     | /        | Huang <i>et al.</i> (2008) |
|    |    | 沙溪  | 闪长岩    | 128.3±1.5 | Cu       | 岳娜等(2020)                  |
|    | 宁镇 | 冶山  | 闪长岩    | 127.7±1.0 | Fe-B     | 郭泳杰(2019)                  |

石,局部地区向辉长岩或石英二长岩演化.部分岩体中发育有大量的深部来源的橄榄岩包体,指示其可能起源于深部地幔.其中,金岭岩体的围岩为中奥陶统的灰岩和石炭—二叠系的砂岩和页岩,是良好的找矿标志(郭军等,2023).在金岭杂岩体与围岩地层接触带中发现多个铁矿床(点),矿床类型主要为矽卡岩型铁矿.这些闪长岩与铁矿具有一致的形成时间(高继雷等,2021).

班井岩体、利国岩体和夹沟岩体是徐淮地区典型的地质体,空间上均位于徐州市,岩体出露面积不一,利国岩体出露面积最广、班井岩体次之.岩性主要为钙碱性闪长质到石英闪长质为主,浅成相为斑状结构.岩体主要受NW向断裂构造控制,利国岩体叠加NE向断裂,形成交叉控岩—控矿构造(杨德彬等,2008; Xu *et al.*, 2009).已经查明利国岩体存在Fe-Cu-Au多金属矿床,班井岩体存在Cu-Au多金属矿床,夹沟岩体虽然目前并未发现矿床,但其岩性较为单一,为二长闪长斑岩,并且其中含有丰富的地壳捕虏体(周群君等,2014),是研究壳幔相互作用的良好对象.

刘家洼岩体和赤土岭岩体位于大别地区,两个岩体的位置相近,均位于安徽省太湖县,岩体出露面积小,侵位于片麻岩或大别杂岩体中.通过对闪长岩中的锆石测年得到年龄约130 Ma(Huang *et al.*, 2008).除此之外,大别地区还存在其他的高Mg<sup>#</sup>闪长岩体,包括拂晓岩体、桥头集岩体等,部分岩体与Cu、Fe矿伴生.

华北东部不同地区分布有不同类型的闪长质

岩石,它们与早白垩世伸展—减薄峰期同步,岩浆活动受到苏鲁—大别造山带伸展—走滑位移的影响.所有岩体均受到断裂构造的控制,只是断裂的方向以及强弱程度不同,这种差异性为后期形成不同种类的矿床提供条件.部分岩体含有丰富的深部来源的地幔包体,是研究深部地球动力学过程的绝佳对象.

## 2 岩石地球化学特征及意义

中生代高Mg<sup>#</sup>闪长岩广泛分布于鲁西—徐淮—大别地区(图1),不同地区的岩石地球化学特征也各不相同.本文汇总了不同地区的中生代高Mg<sup>#</sup>闪长岩,选取具有代表性的岩体,包括邹平岩体、金岭岩体、铁铜沟岩体、班井岩体、利国岩体、夹沟岩体以及大别地区的部分岩体.其中,邹平岩体和铁铜沟岩体为辉长岩,可以代表原始组分的信息.将这些地区的岩体进行汇总整理,逐个分析岩体的地球化学特征并讨论其岩石成因,从而进一步理解岩石圈演化过程.

### 2.1 岩相学特征及其变化

华北东部高Mg<sup>#</sup>闪长岩的分布范围较广,从鲁西一直延伸到大别地区,其岩相上也存在一定的差别.鲁西北部岩性以辉长岩—闪长岩为主,其中济南岩体、邹平岩体主体岩性为辉长岩.邹平岩体主要为辉长岩杂岩体,包括侵入晚侏罗世的沉积序列和早白垩世青山组玄武质火山岩(Huang *et al.*, 2012).本次采集邹平地区的岩石类型为辉长岩,主要组成矿物为辉石和斜长石,两者解理发育,副矿

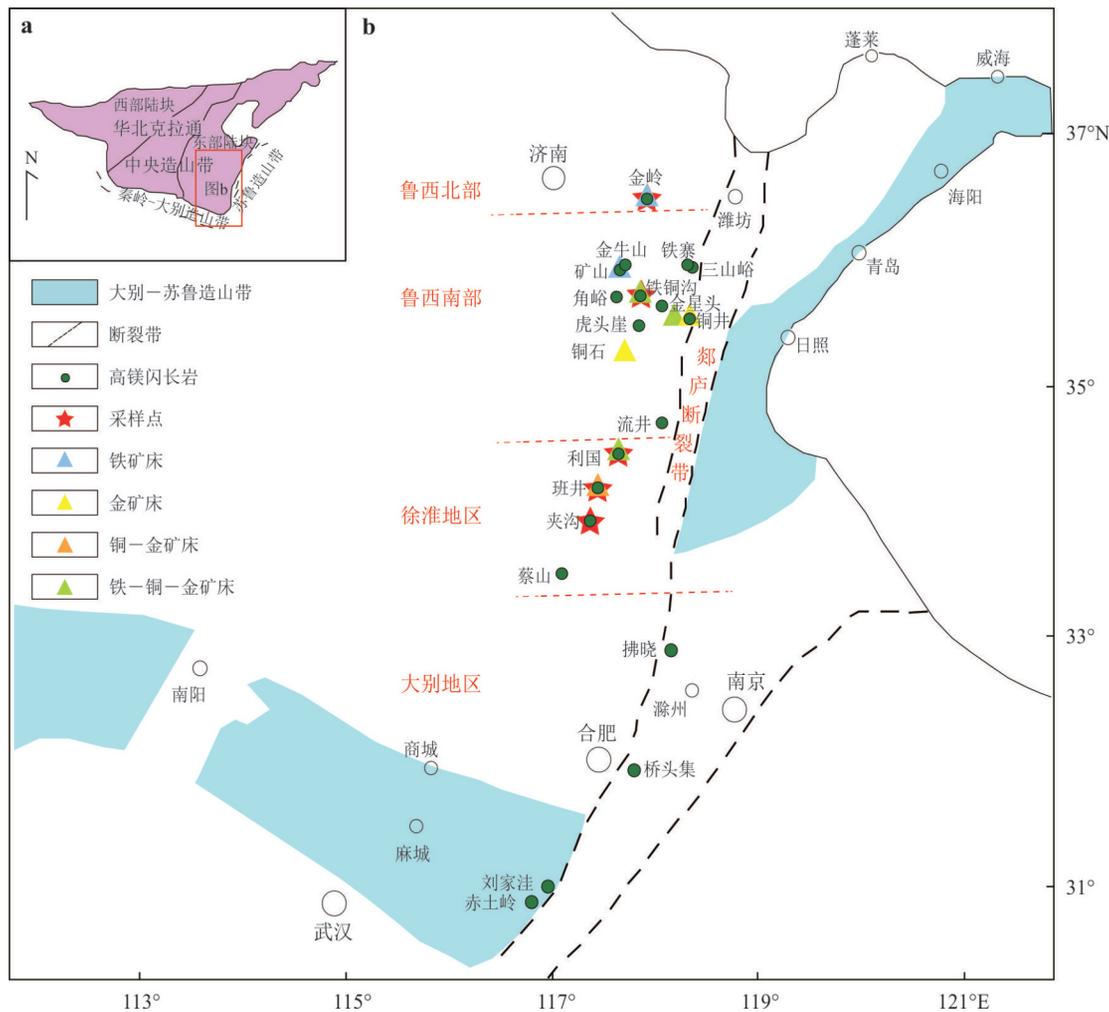


图 1 华北克拉通东部地质图(a,b)

Fig. 1 Geological map of the eastern part of the NCC(a, b)

从北到南将华北东部依次分为鲁西北部、鲁西南部、徐淮地区和大别地区 4 个区域,底图修改自 (Jia *et al.*, 2016)

物有磁铁矿和磷灰石等。金岭岩体为杂岩体,该地区的岩石显示出从辉长闪长岩—二长闪长岩—石英二长岩的侵入序列(Lan *et al.*, 2019),岩石类型为闪长岩,主要矿物为角闪石和斜长石,角闪石呈长柱状,自形程度高,副矿物为磁铁矿(图 3)。金岭岩体存在有不同阶段的角闪石,早期角闪石为浅绿色,长柱状,自形程度高;晚期角闪石为暗褐色,呈溶蚀港湾状,自形程度差,表明金岭岩体具有一定的演化序列。

鲁西南部包含岩体较多,岩性较为复杂,主要包括闪长岩、辉石闪长岩和石英闪长岩等等(Xu *et al.*, 2004b)。铁铜沟岩体是代表性岩体,岩石类型为辉长岩,堆晶结构,主要组成矿物为斜长石、辉石和黑云母,副矿物主要为磁铁矿(图 3)。

徐淮地区存在隐伏杂岩体,岩性有闪长玢岩、角闪闪长玢岩、二长闪长斑岩、石英二长闪长斑岩

等(周虎等, 2019)。典型的地质体为班井岩体、利国岩体和夹沟岩体,这些岩体主要岩石类型为闪长斑岩,斑状结构,镜下可见大量大颗粒自形的斜长石和角闪石,斜长石具有明显的环带结构(图 3)。

大别地区存在闪长岩到花岗闪长岩的侵入系列,主要矿物为角闪石、斜长石、石英、黑云母及少量的钾长石,部分地区存在辉石,副矿物为磁铁矿、锆石和磷灰石(Zhang *et al.*, 2013; Jia *et al.*, 2016)。整个华北东部中生代岩浆岩岩石类型十分复杂、岩石谱系宽而连续,从基性到中酸性岩石均有出露。在岩石分类图解中可以看出,华北东部的岩石类型包含从辉长岩代表的基性岩石到花岗闪长岩代表的中酸性岩石。华北东部的代表性岩体邹平岩体和金岭岩体均呈现出类似的演化序列(图 4)。

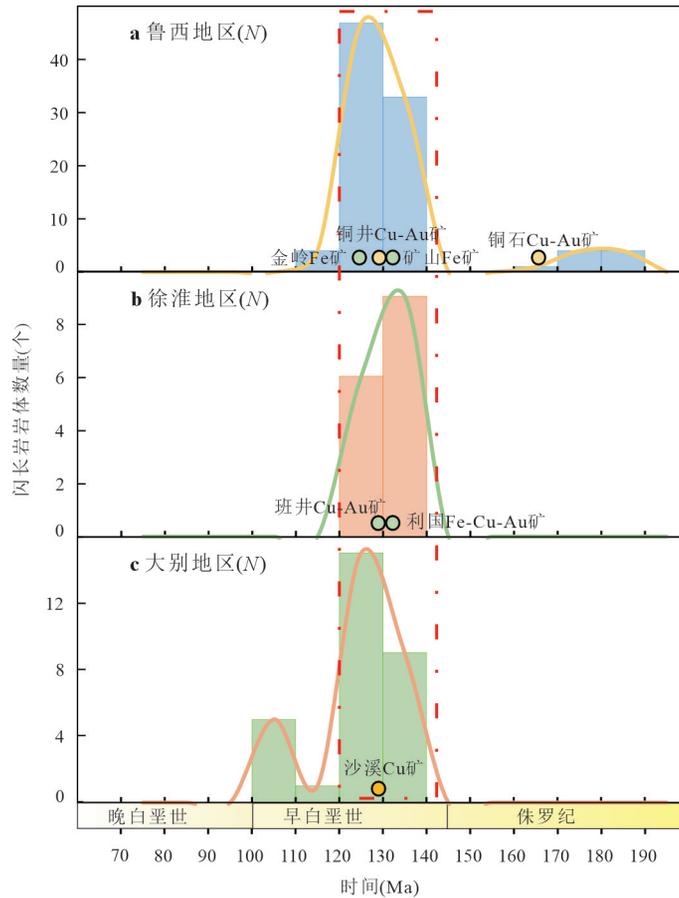


图2 华北东部不同地区闪长岩侵位年龄、年龄曲线及与闪长岩有关的矿床年龄

Fig.2 The emplacement ages of diorite, age curves and ages of ore deposits related to diorites in different regions of eastern NCC  
 图中 a、b、c 分别对应鲁西、徐淮和大别地区, N 代表闪长岩岩体数量, 图中不同颜色的小圆圈代表不同类型的矿床, 仅列举出部分与闪长岩体有关的矿床, 闪长岩岩体年龄和矿床年龄均集中在早白垩世

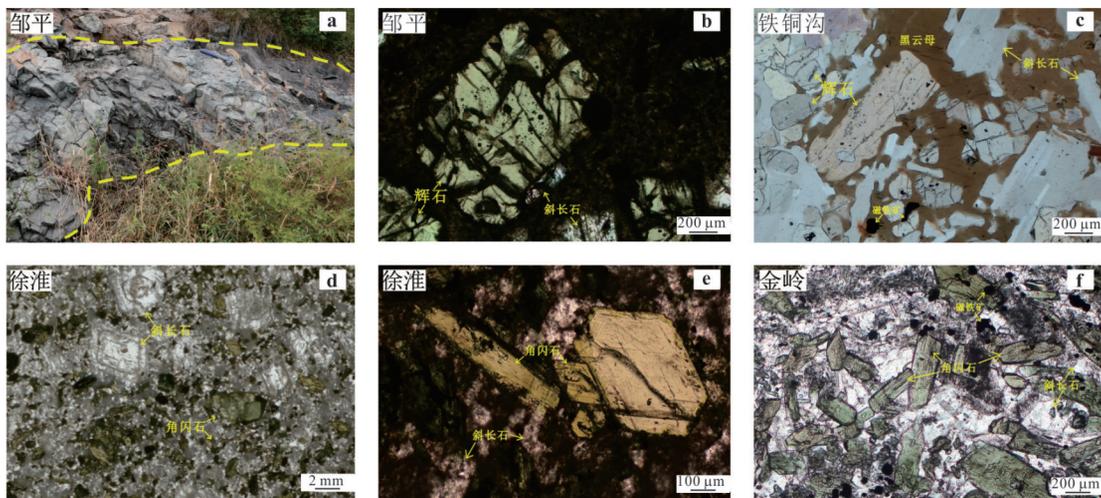


图3 华北东部早白垩世辉长岩—闪长岩野外露头及显微构造特征

Fig. 3 Field outcrops and microscopic structural characteristics of gabbro-diorite in the Early Cretaceous in the eastern North China

2.2 主微量元素特征及其变化

本文根据新获取的邹平岩体、金岭岩体、铁铜

沟岩体和徐淮地区的班井、利国、夹沟岩体的主微量元素数据, 结合前人已经发表的大量数据进行整

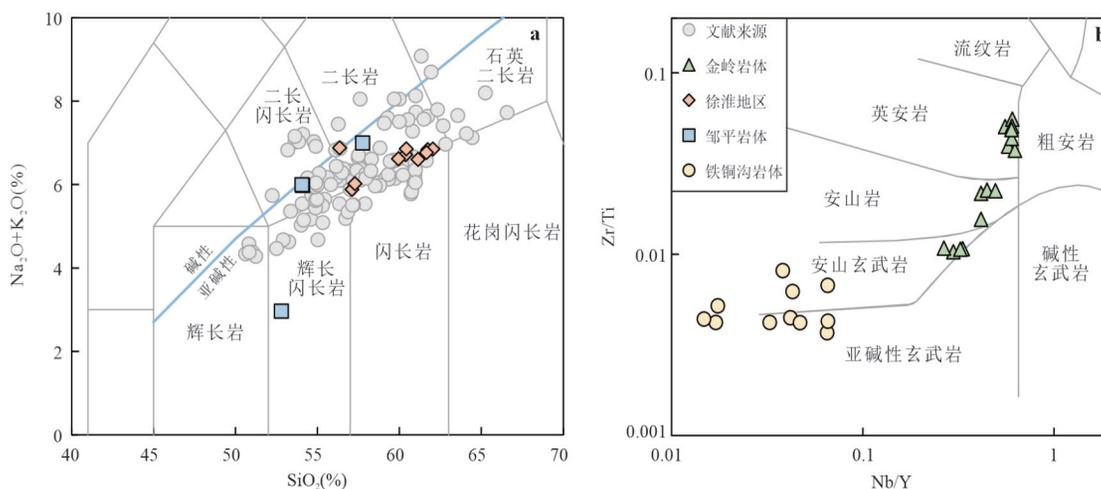


图 4 华北东部早白垩世岩石分类图解

Fig. 4 Classification diagram of rocks in the eastern part of North China during the Early Cretaceous period

图中灰色小圆圈根据已发表的华北东部中生代闪长质岩石的主量元素数据投图,文献数据来源于(巫祥阳等, 2003; 许文良等, 2006; Xu *et al.*, 2006a; 杨承海等, 2006; 资锋等, 2007; Huang *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012; Gu *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013; Jia *et al.*, 2016; 张超等, 2017; 霍腾飞等, 2018; Lan *et al.*, 2019; 张伟强等, 2022; Guo *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2023),彩色部分为本文新采集的样品,数据来源见附表,金岭岩体和铁铜沟岩体缺乏 $SiO_2$ 数据,作于 $Zr/Ti-Nb/Y$ 图中

理分析,讨论华北东部高 $Mg^{\#}$ 闪长岩的主微量元素特征.

已有研究表明,区内闪长质岩石以高 $Mg^{\#}$ (44~81)和富钠(大部分岩体 $K_2O/Na_2O$ 比值小于1)为共同特征.其 $SiO_2$ 含量变化范围为48%~67%, $MgO$ 的含量变化范围为2%~19%,显示出不同的演化程度,金岭岩体存在明显的岩浆演化趋势(图5).鲁西北部 $SiO_2$ 含量变化范围为51%~64%, $MgO$ 的含量变化范围为1.67%~10.2%, $Mg^{\#}$ 值较高,范围为48~81,仅存在一个较低的值( $Mg^{\#}$ 为41),整体上具有高 $Mg^{\#}$ 特征.其 $TiO_2$ (0.56%~1.28%)、 $Al_2O_3$ (10.92%~18.82%)和 $CaO$ (4.11%~9.65%)范围变化最广且与 $MgO$ 存在较好相关性,指示岩浆房经历了显著的矿物分离结晶.鲁西南部地区 $Mg^{\#}$ 值含量变化范围为48~84,与鲁西北部范围接近,同样显示出高 $Mg^{\#}$ 的特征; $Al_2O_3$ 的变化范围为2.3%~17.0%,局部地区可能存在堆晶.南部地区 $MgO$ 变化范围比北部大,且值较高,存在比较原始的组分.

徐淮地区 $SiO_2$ 含量变化范围为55%~67%, $MgO$ 的含量变化范围为1.71%~8.15%, $Mg^{\#}$ 值含量变化范围为49~77. $TiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $CaO$ 、 $Na_2O$ 和 $K_2O$ 含量主要变化范围为0.34%~0.83%、12.92%~17.57%、3.25%~7.33%、3.71%~6.56%、0.89%~3.07%. $K_2O/Na_2O$ 比值为0.17~0.63.

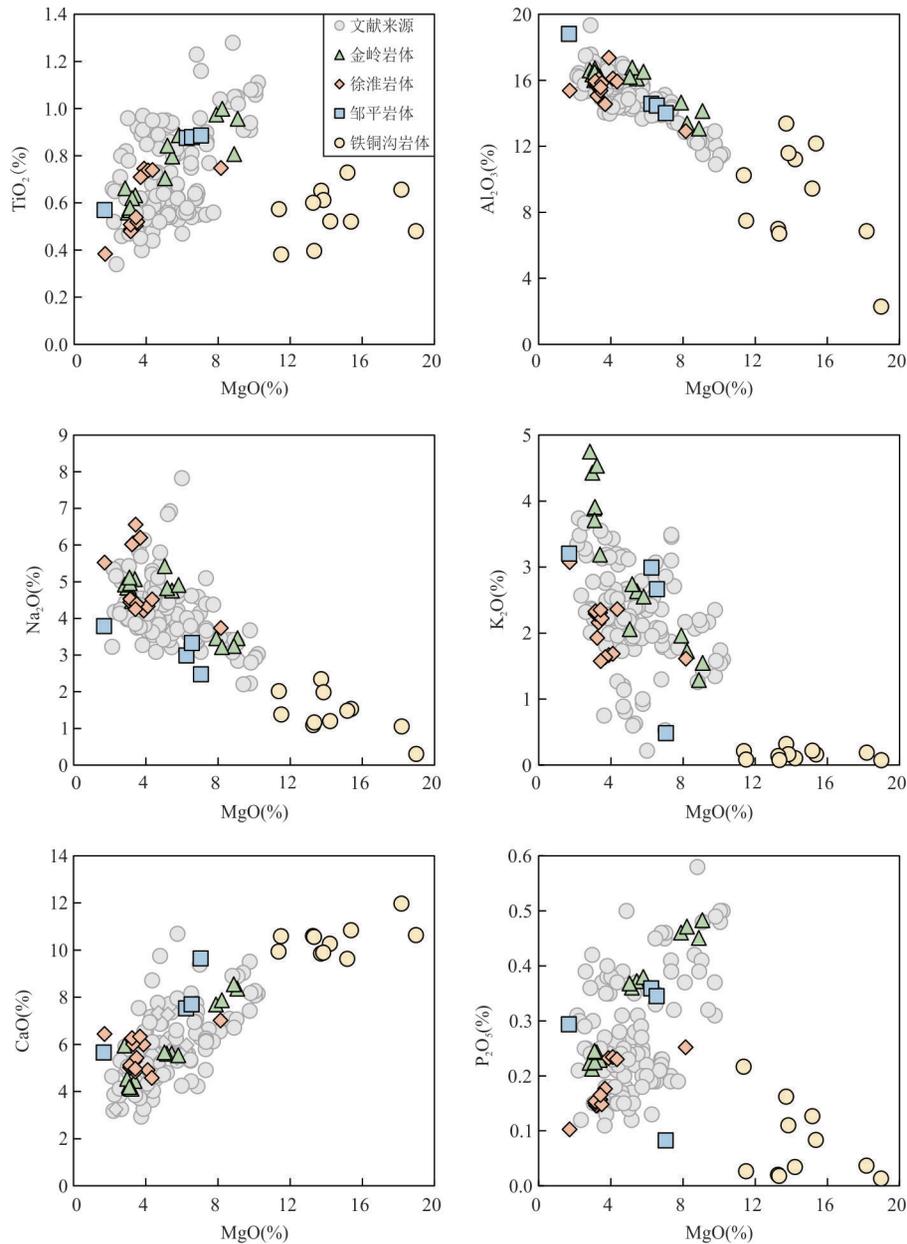
大别地区 $SiO_2$ 含量变化范围为53%~64%, $MgO$ 的含量变化范围为2.13%~7.35%, $Mg^{\#}$ 值含

量变化范围为44~65. $TiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $CaO$ 、 $Na_2O$ 和 $K_2O$ 含量主要变化范围为0.53%~0.97%、14%~19.35%、3.72%~6.25%、3.09%~4.43%、2.01%~3.67%. $K_2O/Na_2O$ 比值为0.45~1.04.

徐淮和大别地区 $TiO_2$ 和 $CaO$ 含量范围变窄, $Al_2O_3$ 范围略高于鲁西地区,且自鲁西南部向南到大别地区 $K_2O/Na_2O$ 比值逐渐升高,可能显示了自北向南钾质组分的逐渐增加.

在主量元素图解中,除铁铜沟岩体外,所有岩体的 $TiO_2$ 、 $CaO$ 、 $P_2O_5$ 与 $MgO$ 均呈现出正相关关系, $Al_2O_3$ 、 $Na_2O$ 、 $K_2O$ 与 $MgO$ 则呈现出负相关关系.铁铜沟岩体的 $K_2O$ 与 $MgO$ 基本无相关关系,而 $P_2O_5$ 与 $MgO$ 则呈现出负相关关系(图5).除铁铜沟的辉长岩岩体外,研究区所有岩体的主量元素特征基本一致,均显示出可能存在辉石、角闪石等镁铁质矿物、含钛氧化物和磷灰石的分离结晶,并且铁铜沟岩体没有演化,代表原始岩浆的组分.从鲁西北部往南到大别地区,岩石类型多且复杂,呈现出从基性到中酸性连续的演化序列:辉长岩—辉石闪长岩—闪长岩—二长岩—石英二长岩,并主要为亚碱性系列.

在微量元素蛛网图及稀土配分模式图中,所有岩体均具有富集轻稀土和 $K$ 、 $Rb$ 、 $Ba$ 等大离子亲石元素,亏损 $Nb$ 、 $Ta$ 、 $Ti$ 等高场强元素的微量元素特征(图6),整体呈现出岛弧型微量元素的特征.但在球粒陨石标准化的稀土配分模式图上,铁铜沟岩体

图5 华北克拉通东部不同岩体高Mg<sup>#</sup>闪长岩主要元素图解Fig.5 Major elements diagrams of high Mg<sup>#</sup> diorites from various plutons in the eastern NCC

数据来源与图4一致

的轻重稀土分异不明显(图6)。

在Mg<sup>#</sup>与Cr、Ni关系图中,大部分岩体Cr、Ni含量(Cr: 150~619 μg/g; Ni: 44~261 μg/g)明显高于地壳值(Cr: 135 μg/g; Ni: 59 μg/g)(Rudnick and Gao, 2003),显示其形成过程中有地幔物质的贡献(图7)。这种明显高于地壳值的Cr、Ni含量表明华北东部中生代高Mg<sup>#</sup>闪长岩可能起源于深部岩石圈地幔。

### 2.3 Sr-Nd-Pb同位素特征及其空间变化

由于地壳物质具有放射性Sr-Nd同位素组成,

岩浆上升演化过程中如果发生地壳混染, (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>和ε<sub>Nd</sub>(t)会随SiO<sub>2</sub>含量的增加分别升高和降低。然而,高Mg<sup>#</sup>闪长岩(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>和ε<sub>Nd</sub>(t)与SiO<sub>2</sub>含量并未呈现出此相关性(图8),同时具有远高于地壳Cr、Ni含量。这一特征表明岩浆受地壳混染影响甚微。它们整体明显富集LREE和LILE,亏损HFSE元素以及具有富集的Sr-Nd同位素特征,高Mg<sup>#</sup>闪长岩的矿物学和岩石地球化学特征反映这些岩浆来自交代地幔源区。前人研究的华北地区幔源基性岩浆与这些高Mg<sup>#</sup>闪长岩具有一致的岩石地球化学特征

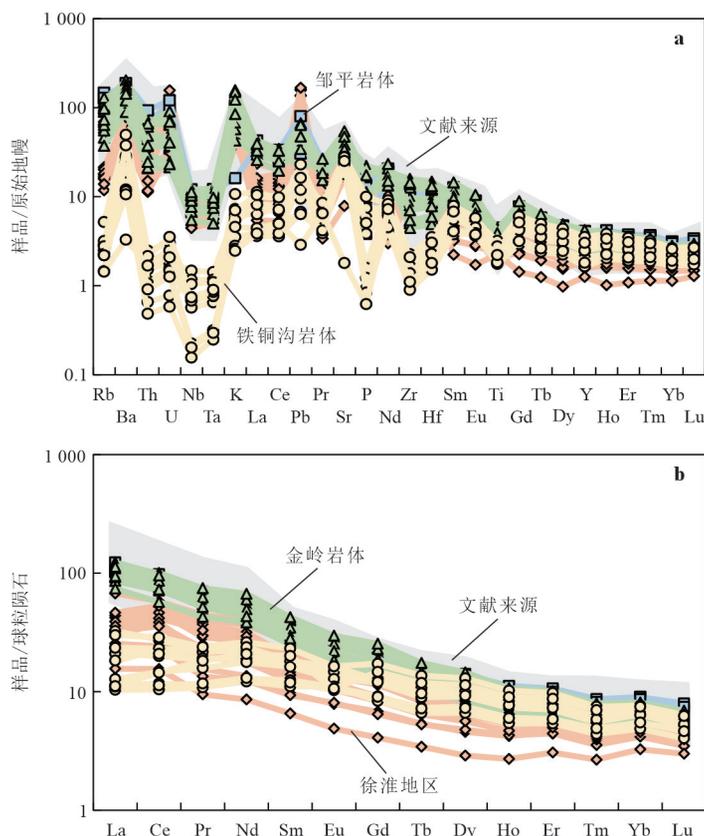


图 6 华北东部不同地区辉长岩—闪长岩微量元素蛛网图(a)和稀土配分模式图(b)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized spider grams(b) of gabbro-diorite in different areas of eastern NCC

图中阴影部分根据前人已发表的华北东部中生代闪长质岩石的微量元素数据投图,数据来源与图 4 一致,图中岩体均显示出富集大离子亲石元素、亏损高场强元素的岛弧型微量元素特征

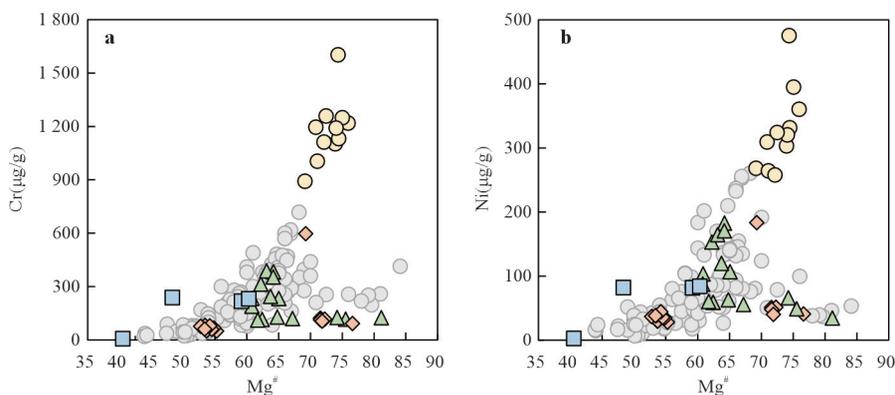


图 7 华北东部辉长岩—闪长岩 Mg<sup>#</sup>-Cr 和 Mg<sup>#</sup>-Ni 关系图

Fig.7 Relationship diagram of Mg<sup>#</sup>-Cr and Mg<sup>#</sup>-Ni for gabbro-diorite in eastern North China  
数据来源与图 4 一致,图例与图 5 一致

同时包含大量地幔包体,进一步支撑了富集岩石圈地幔起源的观点(Guo *et al.*, 2003; Huang *et al.*, 2012; 庞崇进, 2015; Li *et al.*, 2020).

研究发现,华北东部存在典型的地幔不均一特征. 在 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 与 ε<sub>Nd</sub>(*t*) 关系图解中,鲁西北部辉

长岩和闪长岩落入 EM1 地幔源区,鲁西南部、徐淮地区、大别地区的闪长岩落入 EM2 地幔源区,不同地区的 ε<sub>Nd</sub>(*t*) 值均具有较大的变化范围. 整个鲁西地区自东南到西北,空间上显示出 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 比值降低 (0.711 7~0.704 3), ε<sub>Nd</sub>(*t*) 值升高 (-19.0~

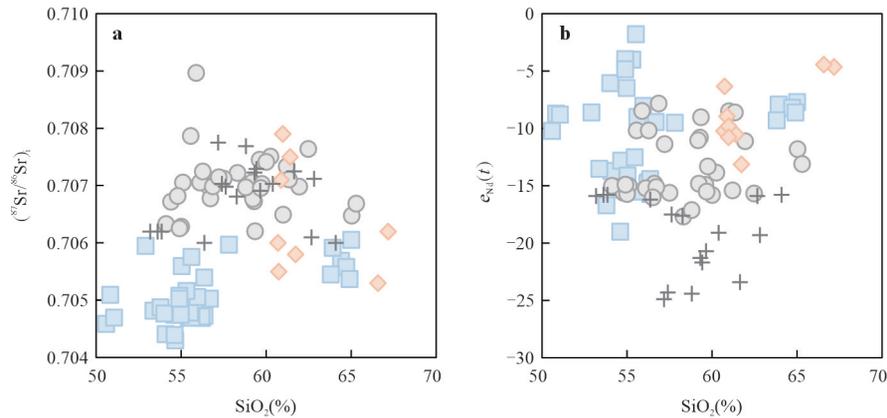


图8 华北东部中生代辉长岩—闪长岩  $\text{SiO}_2$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  与  $\text{SiO}_2$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  图解

Fig.8 Diagram of  $\text{SiO}_2$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  and  $\text{SiO}_2$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  of Mesozoic gabbros and diorites in eastern North China

图中数据是根据前人已经发表的华北东部中生代闪长质岩石的主量、微量元素数据投图,数据来源于(巫祥阳等, 2003; Xu *et al.*, 2006a; Huang *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012; Gu *et al.*, 2013; 宁培松等, 2013; 霍腾飞等, 2018; Lan *et al.*, 2019; 高明波等, 2022; 张伟强等, 2022; Guo *et al.*, 2023, 2024), 图例与图9一致

-1.77) 的特征, 这些特征与前人的研究结果相符 (Huang *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012; Deng *et al.*, 2018). 大别地区的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值明显低于鲁西和徐淮地区 (图9, Zhao *et al.*, 2011). Sr-Nd 两端元混合模拟计算结果表明, 鲁西北部地区高  $\text{Mg}^\#$  闪长岩 Sr-Nd 同位素特征可由华北古老岩石圈地幔与华北地壳物质混合形成, 而鲁西南部、徐淮和大别地区的高  $\text{Mg}^\#$  闪长岩 Sr-Nd 同位素则是扬子地壳物质加入岩石圈地幔的结果.

Pb 同位素能有效区分华北克拉通基底物质与扬子克拉通基底物质. 扬子克拉通地壳 Pb 同位素组成显著高于华北克拉通 [ $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  值高于 17.80,  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  值高于 15.50,  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  值高于 38.00; 李曙光和杨蔚, 2002; 杨德彬等, 2008; 高明波等, 2022]. 华北东部中生代高  $\text{Mg}^\#$  闪长岩形成过程中有地壳物质的加入, 对于这种地壳物质的来源, 学者们持有不同的观点: 部分学者认为它们来源于拆沉的华北陆块下地壳 (Xu *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2012); 也有另一部分学者则认为它们来源于三叠纪时期大陆碰撞过程中的扬子陆块 (Yang *et al.*, 2012; Xiong *et al.*, 2021; Li and Yan, 2022). 在  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ - $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  图解中 (图10), 所有样品均落在北半球参考线之上, 鲁西大部分样品落入华北克拉通基底 Pb 同位素范围内, 但是南部部分样品落入扬子克拉通基底范围内, 表明鲁西地区可能既存在华北下地壳物质也存在扬子下地壳的物质. 徐淮地区大部分样品落入扬子克拉通基底 Pb 同位素范围内, 岩浆源区含扬子克拉通

基底物质. 这一结果也与 Sr-Nd 同位素模拟结果相耦合, 进一步证实地幔源区中地壳物质的差异.

### 3 壳幔相互作用与扬子板块的俯冲响应

壳幔相互作用是指地壳和地幔之间的物质和能量交换, 这一过程对地球的演化和岩石圈的动力学研究具有深远的影响. 前已述及, 高  $\text{Mg}^\#$  闪长岩是一种  $\text{Mg}^\#$  值较高的中性侵入岩, 其地球化学特征和同位素特征在壳幔相互作用的研究中具有重要意义, 可以揭示壳幔相互作用的机制.

高  $\text{Mg}^\#$  闪长质岩石类型多样, 包括高镁埃达克岩、赞岐岩、玻安岩、Bajaites high Mg andesites (HMA) 等. 华北东部主要发育的岩石类型为高  $\text{Mg}^\#$  闪长岩. 与玻安岩相比, 高  $\text{Mg}^\#$  闪长岩的 MgO 含量较低 (玻安岩  $\text{MgO} > 8\%$ , 而已搜集的华北东部地区除偏基性的铁铜沟辉长岩外, 其余所有岩体 MgO 含量均  $< 8\%$ ); 与 Bajaites HMA 相比, 其 Sr 含量较低 (Bajaites HMA 的 Sr 含量  $> 1\,000 \times 10^{-6}$ ) (宋明春等, 2020). 华北东部高  $\text{Mg}^\#$  闪长岩的地球化学特征更接近于高镁埃达克岩和赞岐岩, 其在 Sr-Y 图解中绝大多数样品点落在埃达克岩范围内, 表现出埃达克岩的特征 (图11). 学者们研究发现高镁埃达克岩和赞岐岩主要发育在俯冲板片的碰撞背景下 (Gu *et al.*, 2013; Lan *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2023), 但是华北东部高  $\text{Mg}^\#$  闪长岩是在中生代伸展—裂解的构造背景下形成, 它们具有与埃达克岩类似的地球化学特征, 这为研究其岩石成因以及非

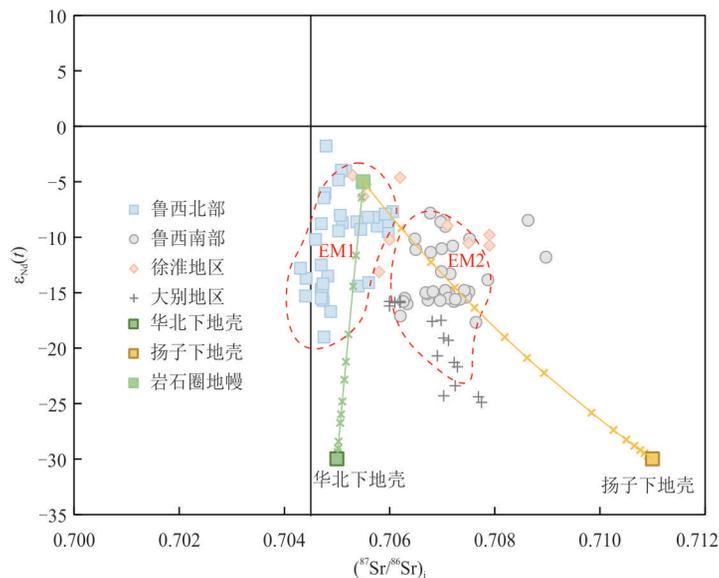


图 9 华北东部中生代闪长岩  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  图解

Fig.9  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  diagram of Mesozoic diorites in eastern North China

端元混合模拟数值参考表 2; 图中数据是根据前人已经发表的华北东部中生代闪长质岩石的微量元素数据投图, 数据来源与图 8 一致

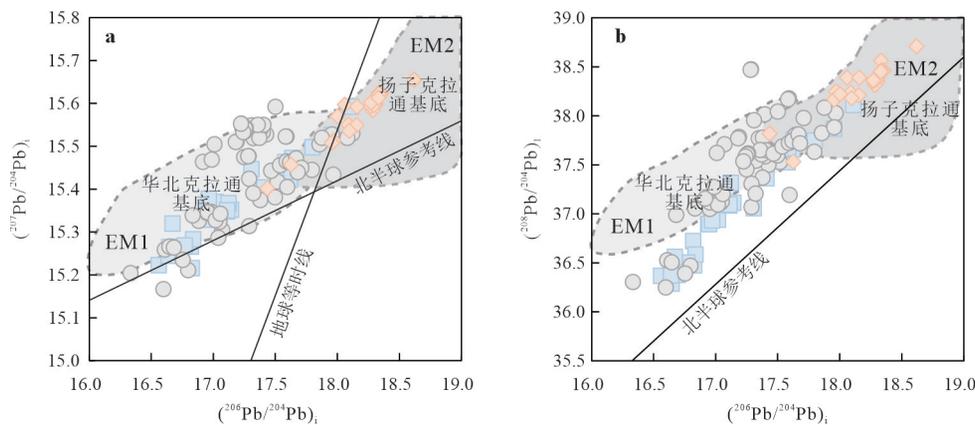


图 10 华北东部中生代闪长岩初始 Pb 同位素组成图解

Fig.10 Initial Pb isotopic composition diagram of Mesozoic diorites in eastern North China

底图修改自 Yang *et al.* (2012); 图中数据来源于 Xu *et al.* (2004a, 2004b); Zhang *et al.* (2004); Liu *et al.* (2006); 杨承海等 (2008); 杨德彬等 (2008); 王永等 (2011); Yang *et al.* (2012); 宁培松等 (2013); Wang *et al.* (2018); Lan *et al.* (2019); 高明波等 (2022); Wu *et al.* (2023), 图例与图 9 一致

表 2 两端元混合模拟使用的参数表

Table 2 Parameter table for mixed simulation of two end elements

| 端元    | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | Sr<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | $\epsilon_{\text{Nd}}$ | Nd<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | 参考文献                       |
|-------|---------------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 岩石圈地幔 | 0.705 5                         | 20                        | -5                     | 1                         | Xu <i>et al.</i> (2004a)   |
| 华北下地壳 | 0.705 0                         | 1 250                     | -30                    | 60                        | Huang <i>et al.</i> (2012) |
| 扬子下地壳 | 0.711 0                         | 300                       | -30                    | 20                        | Jahn <i>et al.</i> (1999)  |

弧环境下埃达克岩的形成提供了参考。

然而, 华北东部地区高 Mg<sup>#</sup>闪长岩的成因复杂多样, 存在多种模型. 虽然有些学者认为其来源于

俯冲大洋板片的部分熔融 (Wu *et al.*, 2023), 或加厚下地壳的部分熔融 (Atherton and Petford, 1993; 李承东等, 2004), 但大部分学者用拆沉模式 (Gao *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2006a, 2008)、交代岩石圈成因 (宋明春等, 2020)、幔源岩浆分离结晶 (Yang *et al.*, 2012) 或岩浆混合等模式 (陈斌等, 2013; Zhang *et al.*, 2013) 来解释华北东部高 Mg<sup>#</sup>闪长岩的岩石成因和岩石圈演化. 这些岩石受地壳混染影响较小, 具有中等硅、高 Mg<sup>#</sup>、富钠和相对高的 Cr、Ni 含量, 富集的 Sr-Nd 同位素特征和岛弧型微量元

素组成(图 6, 7 和 9). 其中鲁西北部具有低的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值和相对高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值的特征, 呈现出受华北地壳物质交代的 EM1 型地幔源区的特征; 鲁西南部、徐淮、大别地区具有高的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值和相对低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值的特征, 呈现出受扬子地壳物质交代的 EM2 型地幔源区的特征(图 9). 这种富集的同位素组成与俯冲大洋板片部分熔融产生的亏损特征不符(Defant and Drummond, 1990). 其他几个重要的成因模式均涉及到了壳幔相互作用, 这表明壳幔相互作用对于研究高  $\text{Mg}^{\#}$  闪长岩岩石成因十分重要. 前面提到高  $\text{Mg}^{\#}$  闪长岩的地球化学特征与 Stern *et al.* (1989) 定义的由富集地幔直接熔融形成的赞岐岩类似, 暗示富集地幔可能为主要源区. 结合放射性同位素特征认为华北东部高  $\text{Mg}^{\#}$  闪长岩均来源于受地壳物质交代的富集岩石圈地幔源, 只是不同地区, 华北地壳和扬子陆块的对交代组分的贡献比例不同.

华北东部中生代高  $\text{Mg}^{\#}$  闪长岩大多数样品点落入埃达克岩范围内, 显示出高 Sr/Y 的特征(图 11). 金岭岩体和铁铜沟岩体 ( $\text{Dy}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> 也明显高于 MORB 值, 并且铁铜沟岩体的  $\text{Mg}^{\#}$  值变化不大, 指示岩浆源区含有石榴石. 近同期的费县一方城高镁玄武岩的 ( $\text{Dy}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> 最高, 远高于 MORB 值, 进一步证明岩浆源区含石榴石(Gao *et al.*, 2008). 此外, 石榴石的结晶可以导致 ( $\text{Dy}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> 升高. 金岭岩体随着  $\text{Mg}^{\#}$  的降低, ( $\text{Dy}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> 明显升高, 暗示岩浆演化过程存在石榴石的分离结晶(图 11). 尽管金岭岩体和铁铜沟岩体中并没有观察到石榴石的存在, 但是微量元素特征暗示石榴石印记的存在可以代表母岩浆较大的来源深度. 无论是岩浆源区本身含有石榴石还是演化过程中石榴石的分离, 这种差异也反映地幔的不均一性.

Sr-Nd-Pb 同位素特征表明, 华北东部中生代高  $\text{Mg}^{\#}$  闪长岩兼具华北和扬子的地壳信息, 但不同壳源物质对地幔性质的影响不同: 鲁西南部、徐淮和大别地区初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值较高,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值变化范围较大, 大别地区存在极低值(-24.90), 这种强烈富集的现象可以用扬子大陆地壳物质的加入来解释. 并且越向南靠近, 受扬子壳源物质的改造程度越大, 与三叠纪时期扬子板块的俯冲方向一致(Dai *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2013); 鲁西北部地区初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值较低,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值整体要高于大别地区, 位于陆内, 表明其受扬子壳源物质影响较弱, 该区

域低 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 的闪长岩具有低的 ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>i</sub> 和 ( $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>i</sub>, 与华北古老变质基底相似的 Pb 同位素说明源区存在华北地壳物质. 华北东部不同地区显示出不同壳源物质改造的特征, 表明其存在大范围的空间差异性. 基于华北东部早白垩世不同地区 Sr-Nd 同位素分布图(图 12), 表明华北东部存在显著的地幔不均一性, 这一结论与前人的研究相吻合(Deng *et al.*, 2018; 汪浪等, 2024). 这种空间不均一性可能与岩石圈厚度也存在一定的关联. 学者们研究发现, 华北东部自东南至西北向, 岩石圈厚度存在逐渐减薄的趋势(Shi *et al.*, 2013), 这也与扬子板块俯冲方向以及对岩石圈地幔改造程度一致.

综上, 由于华北克拉通曾遭受到多角度的俯冲作用, 包括扬子板块的俯冲碰撞、古太平洋板块的俯冲等(Zhu *et al.*, 2011). 在周围板块的挤压碰撞作用下, 克拉通发生破坏, 岩石圈厚度减薄(Chen and Zhou, 2005). 考虑到中生代时期华北克拉通的地质背景, 认为高  $\text{Mg}^{\#}$  闪长岩所记录的壳幔物质信息反映了拆沉作用以及三叠纪时期扬子板块北向俯冲于华北陆块之下的地球动力学过程.

## 4 成矿启示

中生代时期, 华北东部发生了大规模的成矿作用, 形成了一系列的 Fe、Cu、Au、Mo 等金属矿床. 这些金属矿床与高  $\text{Mg}^{\#}$  闪长岩之间存在紧密的关联. 在时间上, 这些矿床主要形成于早白垩世, 与高  $\text{Mg}^{\#}$  闪长岩的形成时代一致, 岩体的形成年龄可以代表成矿时代(Wang *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2017). 在空间上, 高  $\text{Mg}^{\#}$  闪长岩与金属矿床伴生. 例如华北东部的矽卡岩型铁矿在时空上与高  $\text{Mg}^{\#}$  闪长岩体紧密伴生, 矿体赋存在早白垩世高  $\text{Mg}^{\#}$  闪长侵入岩与奥陶系马家沟组灰岩接触带附近(陈应华等, 2017).

学者们通过对脉石矿物中流体包裹体的 H-O-C-S 同位素研究发现, 中生代岩浆流体与成矿流体具有相似的同位素组成, 表明同期岩浆对成矿具有贡献. 华北东部中生代时期的矿床类型主要为热液型、斑岩型和矽卡岩型. 这 3 种类型矿床的形成都与闪长质岩浆所提供成矿物质有关. 其中矽卡岩型矿床是闪长质岩浆通过结晶分异作用或岩浆脱水形成的流体与围岩反应的结果, 成矿物质主要来源于闪长质岩浆. 而斑岩型金属矿产则是中酸性岩浆在地壳浅部侵位时脱水形成的成矿流体与围岩相互

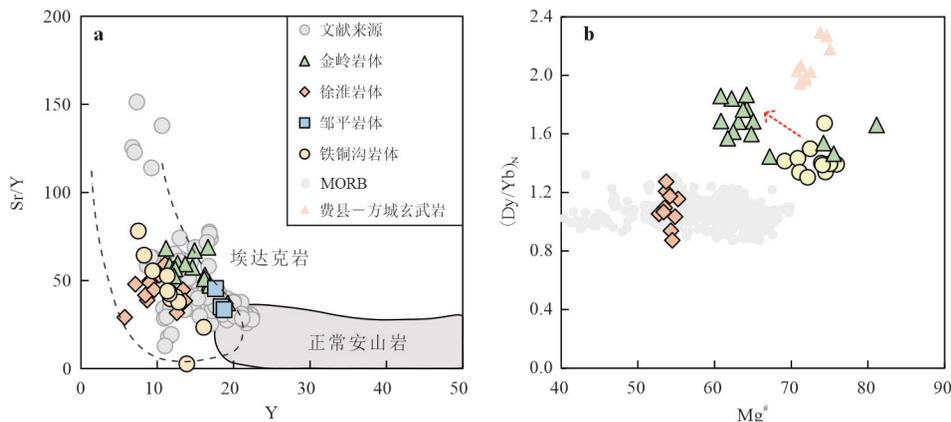


图 11 华北东部不同地区早白垩世高 Mg<sup>#</sup> 闪长岩的 Sr/Y-Y, Mg<sup>#</sup>-(Dy/Yb)<sub>N</sub> 图解

Fig.11 Sr/Y-Y and Mg<sup>#</sup>-(Dy/Yb)<sub>N</sub> diagram of Mesozoic high Mg<sup>#</sup> diorites in different regions of eastern NCC

图中数据是根据前人已经发表的华北东部中生代闪长岩岩石的主量、微量元素数据投图, 数据来源与图 4 一致, MORB 数据来源于 Jenner and O'Neill(2012), 大部分样品点均落在埃达克岩范围内, 金岭岩体和铁铜沟岩体初始岩浆 (Dy/Yb)<sub>N</sub> 明显高于 MORB 值, 表明岩浆源区含有石榴石. 金岭岩体的演化趋势表明岩浆演化过程中存在石榴石结晶

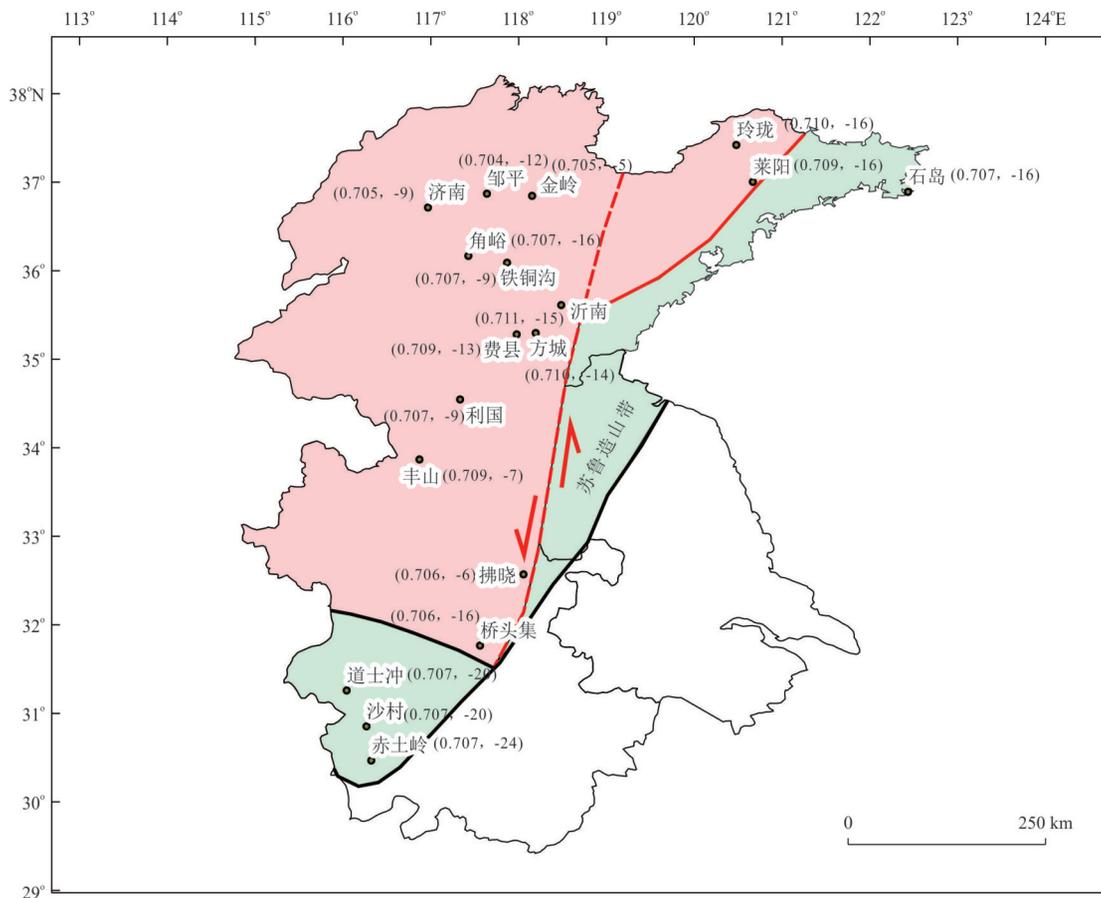


图 12 华北东部不同地区早白垩世中基性岩 Sr-Nd 同位素分布图

Fig.12 Sr-Nd isotopic distribution of intermediate basaltic rocks in different regions of eastern North China during the Early Cretaceous  
图中绿色部分为苏鲁一大别造山带的范围, 中生代时期苏鲁造山带沿郯庐断裂带左行走滑约 500 km 到达现今位置, 红色虚线为郯庐断裂带位置, 两侧为走滑方向, 图中岩体旁括号内数字分别代表 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>1</sub> 和 ε<sub>Nd</sub>(t) 值, 填图数据来源于 Xu *et al.* (2006a); Zhao *et al.* (2011); 霍腾飞等 (2018); Wang *et al.* (2020) 及其所引的文献

作用的结果(杨进辉等, 2021)。因此,华北东部中生代各类矿床的形成与高 Mg<sup>#</sup>闪长岩之间存在紧密的成因联系。

不同于以往的挤压的构造背景,华北东部中生代矿床是在早白垩世伸展—裂解的背景下形成的。在此构造背景下,华北东部发育了大量的多金属矿床,以鲁西地区最为典型(Jin *et al.*, 2015)。从空间上看,华北东部的矿床类型似乎存在一定的分布规律。鲁西北部的金岭岩体和矿山岩体与 Fe 矿有关,鲁西南部的铜石岩体和铜井岩体与 Au 矿床有关,铁铜沟岩体与 Fe-Cu-Au 多金属矿床有关。徐淮地区的利国岩体与 Fe-Cu-Au 多金属矿床有关,班井岩体与 Cu-Au 矿床有关。从西北到东南,矿床类型大体从 Fe 矿向 Cu-Au 多金属矿床转变。这种空间规律似乎与华北东部的地幔源区的性质相吻合。前已述及,华北东部为富集的岩石圈地幔,但是这种富集程度存在空间差异性。从空间上看,EM1 型的地幔源区主要包括 Fe 矿,EM2 型的地幔源区主要包括 Au 矿和 Fe-Cu-Au 多金属矿床,但也存在 Fe 矿的分布。地幔源区的地球化学性质的差异性是否是造成其成矿差异性还需要进一步研究。

中生代时期华北克拉通处于岩石圈减薄的伸展构造背景下,这种地质背景容易发育断裂构造,为深部岩浆的上升及所携带的成矿流体提供通道。特别是那些跨岩石圈尺度的大型构造断裂带,例如华北东部的郯庐断裂带,它们一方面为地幔来源的岩浆提供了迁移和演化的通道,另一方面其两侧的次级断裂带也为成矿热液流体提供了运输和沉淀的空间(Meng *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2020; 汪在聪等, 2021)。华北东部不同地区断裂构造的规模、大小、方向也存在不同。此外,部分学者研究发现华北东部地区地壳厚度也存在变化,自东南向西北,岩石圈厚度逐渐减薄(Shi *et al.*, 2013)。无论是 EM1 型地幔源区还是 EM2 型地幔源区都可以成矿,只是矿床的类型和规模存在差异,这可能是由于地壳厚度和断裂构造的差异造成不同地区的演化路径存在差异。

综上所述,高镁闪长岩与成矿之间存在紧密的成因联系,所有矿体均是在壳幔相互作用下产生的,因此高镁闪长岩是一个良好的找矿标志。华北东部不同地区如何形成不同类型和不同规模的矿产可能与闪长质岩浆的演化路径存在一定的关联,目前具体过程和机制仍不清楚,需要未来进一步的

探讨研究。

致谢:野外采样得到了王美玲、邹宗琪、张佳欣、高扬、李嘉威和蔡芳森等人的帮助,在此表示衷心的感谢。感谢编辑和两名匿名审稿人对本文提出的宝贵建议。

## Reference

- Atherton, M. P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust. *Nature*, 362(6416): 144–146. <https://doi.org/10.1038/362144a0>
- Bai, X. W., Zhou, H., Liu, Z. Y., et al., 2024. Petrogenesis and Dynamic Setting of Silurian High-Mg Diorites in the Dulan Area, Northern Qaidam: Constraints of Zircon U-Pb Chronology, Geochemistry and Hf Isotope. *Mineralogy and Petrology*, 44(3): 25–38(in Chinese with English abstract).
- Chan, S. W., Zhang, J. J., Gu, D. N., 2022. Rock Association and Spatial and Temporal Distribution of Intrusive Rocks in Xu(Zhou)-Huai(Bei) Area, Southeastern Margin of North China Block. *Journal of Geology*, 46(3): 237–244(in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Chen, C. J., He, J. B., et al., 2013. Origin of Mesozoic High-Mg Adakitic Rocks from Northeastern China: Petrological and Nd-Sr-Os Isotopic Constraints. *Chinese Science Bulletin*, 58(20): 1941–1953(in Chinese with English abstract).
- Chen, L. H., Zhou, X. H., 2005. Subduction-Related Metasomatism in the Thinning Lithosphere: Evidence from a Composite Dunite-Orthopyroxenite Xenolith Entrained in Mesozoic Laiwu High-Mg Diorite, North China Craton. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(6): 2005GC000938. <https://doi.org/10.1029/2005GC000938>
- Chen, Y. H., Lan, T. G., Wang, H., et al., 2017. LA-ICP-MS Trace Element Analysis of Skarn-Type Magnetite Deposits in the Zibo-Laiwu Region. The 8th National Academic Symposium on Metallogenic Theory and Prospecting Methods, Beijing(in Chinese).
- Dai, L. Q., Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., et al., 2011. Zircon Hf-O Isotope Evidence for Crust-Mantle Interaction during Continental Deep Subduction. *Earth and Planetary Science Letters*, 308(1/2): 229–244. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.06.001>
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662–665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Deng, J., Wang, C. M., Bagas, L., et al., 2018. Crustal Ar-

- chitecture and Metallogenesis in the South-Eastern North China Craton. *Earth-Science Reviews*, 182: 251–272. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.05.001>
- Gao, J. L., Zhou, Y. G., Zhang, Z. F., et al., 2021. Magma Source and Tectonic Setting of Jinling Pluton in Eastern North China Craton: Evidences from Petrography, Petrogeochemistry and Chronology. *Chinese Journal of Geology(Scientia Geologica Sinica)*, 56 (01): 253–271(in Chinese with English abstract).
- Gao, M. B., Gao, J. L., Zhang, Y. M., et al., 2022. Magma Source and Genesis of the Kuangshan Complex in Laiwu County of the Western Shandong: Constraints from Geochronology, Geochemistry, Bulk Rock Sr-Nd-Pb Isotopes and Zircon Hf Isotopes. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 41 (02): 287–306(in Chinese with English abstract).
- Gao, M. B., Gao, J. L., Zhang, Y. M., et al., 2022. Petrogenesis of Early Cretaceous Intrusive Rocks in Yanan Area of the Western Shandong, China: Implication for Crust-Mantle Interaction beneath North China Block. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 44(5): 723–749(in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Rudnick, R. L., Xu, W. L., et al., 2008. Recycling Deep Cratonic Lithosphere and Generation of Intraplate Magmatism in the North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 270(1/2): 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.03.008>
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892–897. <https://doi.org/10.1038/nature03162>
- Gao, S., Zhang, B. R., Jin, Z. M., et al., 1998. How Mafic Is the Lower Continental Crust? *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1/2/3/4): 101–117. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00140-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00140-X)
- Gu, H. O., Xiao, Y. L., Santosh, M., et al., 2013. Spatial and Temporal Distribution of Mesozoic Adakitic Rocks along the Tan-Lu Fault, Eastern China: Constraints on the Initiation of Lithospheric Thinning. *Lithos*, 177: 352–365. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.07.011>
- Guo, F., Fan, W. M., Wang, Y. J., et al., 2003. Geochemistry of Late Mesozoic Mafic Magmatism in West Shandong Province, Eastern China: Characterizing the Lost Lithospheric Mantle beneath the North China Block. *Geochemical Journal*, 37(1): 63–77. <https://doi.org/10.2343/geochemj.37.63>
- Guo, J., Huang, X. L., He, P. L., et al., 2024. Compositional Variations of Amphiboles from Mesozoic High-Mg Diorite in Western Shandong: Implications for the Mineralization of Skarn-Type Iron Deposits. *Geotectonica et Metallogenia*, 48(4): 800–819(in Chinese with English abstract).
- Guo, J., Huang, X. L., He, P. L., et al., 2024. Genesis of Mesozoic High-Mg Dioritic Rocks from the Eastern North China Craton: Implications for the Evolution of Continental Lithosphere. *American Mineralogist*, 109(1): 198–214. <https://doi.org/10.2138/am-2022-8755>
- Guo, J., Huang, X. L., Zhang, L., et al., 2023. Decoupling between SRPB and NDHF Isotopes of Mesozoic Mafic Rocks in the Eastern North China Craton: Implication for Multi-Stage Modification of Sub-Continental Lithospheric Mantle. *Lithos*, 442: 107096. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107096>
- Guo, P., 2014. Geodynamic Setting of Mesozoic Gold Metallogeny in the Western Shandong Province(Dissertation), China University of Geoscience(Beijing), Beijing (in Chinese with English abstract).
- Guo, Y. J., 2019. The Geochemistry of Magmatic Rocks in Ningzhen Area(Dissertation). Hefei University of Technology, Hefei(in Chinese with English abstract).
- Hu, H. B., Mao, J. W., Liu, D. Y., et al., 2004. The Shrimp Age of Zircon from Tongshimagmatic Complex in Western Shandong and Its Geological Implications. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 453–460(in Chinese with English abstract).
- Huang, F., Li, S. G., Dong, F., et al., 2008. High-Mg Adakitic Rocks in the Dabie Orogen, Central China: Implications for Foundering Mechanism of Lower Continental Crust. *Chemical Geology*, 255(1/2): 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.02.014>
- Huang, X. L., Zhong, J. W., Xu, Y. G., 2012. Two Tales of the Continental Lithospheric Mantle Prior to the Destruction of the North China Craton: Insights from Early Cretaceous Mafic Intrusions in Western Shandong, East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 96: 193–214. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.08.014>
- Huo, T. F., Yang, D. B., Shi, J. P., et al., 2018. Early Cretaceous Fengshan and Caishan High-Mg<sup>±</sup> Adakitic Rocks from the Xuzhou-Huaipei Area, Central China: Interaction between Mantle Peridotite and Melt Derived from Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust. *Acta Petrologica Sinica*, 34(6): 1669–1684(in Chinese with English abstract).
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Lo, C. H., et al., 1999. Crust-Mantle Interaction Induced by Deep Subduction of the Continental Crust: Geochemical and Sr-Nd Isotopic Evidence from Post-Collisional Mafic-Ultramafic Intrusions of the Northern

- Dabie Complex, Central China. *Chemical Geology*, 157(1/2): 119–146. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(98\)00197-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(98)00197-1)
- Jenner, F. E., O'Neill, H., 2012. Analysis of 60 Elements in 616 Ocean Floor Basaltic Glasses. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(2): 2011GC004009. <https://doi.org/10.1029/2011GC004009>
- Jia, L. Q., Mo, X. X., Santosh, M., et al., 2016. Early Cretaceous Continental Delamination in the Yangtze Block: Evidence from High-Mg Adakitic Intrusions along the Tanlu Fault, Central Eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 127: 152–169. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2016.06.001>
- Jin, Z. L., Zhang, Z. C., Hou, T., et al., 2015. Genetic Relationship of High-Mg Dioritic Pluton to Iron Mineralization: a Case Study from the Jinling Skarn-Type Iron Deposit in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 957–979. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2015.03.039>
- Lan, T. G., Fan, H. R., Santosh, M., et al., 2012. Early Jurassic High-K Calc-Alkaline and Shoshonitic Rocks from the Tongshi Intrusive Complex, Eastern North China Craton: Implication for Crust-Mantle Interaction and Post-Collisional Magmatism. *Lithos*, 140: 183–199. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.01.015>
- Lan, T. G., Hu, R. Z., Chen, Y. H., et al., 2019. Generation of High-Mg Diorites and Associated Iron Mineralization within an Intracontinental Setting: Insights from Ore-Barren and Ore-Bearing Intrusions in the Eastern North China Craton. *Gondwana Research*, 72: 97–119. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.03.008>
- Li, C., Yan, J., 2022. Geochronological and Geochemical Characteristics of Continental Basalts of the Eastern North China Craton: Insights into Crust-Mantle Interaction Induced by Continental Subduction. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 177(4): 45. <https://doi.org/10.1007/s00410-022-01911-y>
- Li, C. D., Zhang, Q., Miao, L. C., et al., 2004. Mesozoic High-Sr, Low-Y and Low-Sr, Low-Y Types Granitoids in the Northern Hebei Province: Geochemistry and Petrogenesis and Its Relation to Mineralization of Gold Deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 269–284(in Chinese with English abstract).
- Li, J. L., Schwarzenbach, E. M., John, T., et al., 2020. Uncovering and Quantifying the Subduction Zone Sulfur Cycle from the Slab Perspective. *Nature Communications*, 11: 514. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14110-4>
- Li, S. Z., Suo, Y. H., Li, X. Y., et al., 2018. Mesozoic Plate Subduction in West Pacific and Tectono-Magmatic Response in the East Asian Ocean-Continent Connection Zone. *Chinese Science Bulletin*, 63(16): 1550–1593(in Chinese with English abstract).
- Li, S. G., Yang, W., 2002. Decoupling of Deep and Surface Suture Zones in the Dabie Orogen and the Model of Continental Collision Lithospheric Wedge: Evidence from Mesozoic Mantle-Derived Magmatic Rocks Sr-Nd-Pb Isotopes. *Chinese Science Bulletin*, 47 (24): 1898–1905(in Chinese).
- Liu, S., Zou, H. B., Hu, R. Z., et al., 2006. Mesozoic Mafic Dikes from the Shandong Peninsula, North China Craton: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Geochemical Journal*, 40(2): 181–195. <https://doi.org/10.2343/geochemj.40.181>
- Liu, S. Y., Shi, K. X., Zhang, D., et al., 2023. Crust-Mantle Interaction Controls the Formation of High-Mg Adakitic Rocks: Evidence from Early Cretaceous Intrusive Complexes in Luxi Terrane, North China Craton. *Lithosphere*, 2023: 8019744. <https://doi.org/10.2113/2023/8019744>
- Meng, L. Q., Mao, G. Z., Liu, X. T., et al., 2020. Geochemical Studies of the Nanxiaoyao Gold Deposit in Central Yishu Fault Zone, Shandong Province, Eastern China. *Solid Earth Sciences*, 5(1): 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2019.12.004>
- Ning, P. S., Long, Q., Cheng, T., et al., 2013. Geochemistry and Sr-Nd-Pb Isotopic Composition of Late Mesozoic Intermediate-Basic Rock in Western Shandong Block. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 35(4): 62–76 (in Chinese with English abstract).
- Pang, C. J., 2015. Geochronology and Geochemistry of the Cretaceous Mafic Intermediate Volcanic Rocks in the Eastern North China(Dissertation). Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 1–64. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>
- Shi, D. N., Lü, Q. T., Xu, W. Y., et al., 2013. Crustal Structure beneath the Middle-Lower Yangtze Metallogenic Belt in East China: Constraints from Passive Source Seismic Experiment on the Mesozoic Intra-Continental Mineralization. *Tectonophysics*, 606: 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.012>
- Song, M. C., Li, J., Zhou, J. B., et al., 2020. The Discovery and Tectonic Setting of the Early Cretaceous High-Mg Diorites in the Jiaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 36(1): 279–296(in Chinese with English abstract).

- Stern, R. A., Hanson, G. N., Shirey, S. B., 1989. Petrogenesis of Mantle-Derived, LILE-Enriched Archean Monzodiorites and Trachyandesites (Sanukitoids) in Southwestern Superior Province. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26(9): 1688–1712. <https://doi.org/10.1139/e89-145>
- Tian, Z. H., Wang, W., Liu, P. H., 2022. Late Neoproterozoic Tectonic Evolution in Eastern China: Enlightenment from the Ancient Continental Core Restoration. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(4): 681–694(in Chinese with English abstract).
- Wang, F. Y., Liu, S. G., Li, S. G., et al., 2014. Zircon U-Pb Ages, Hf-O Isotopes and Trace Elements of Mesozoic High Sr/Y Porphyries from Ningzhen, Eastern China: Constraints on Their Petrogenesis, Tectonic Implications and Cu Mineralization. *Lithos*, 200: 299–316. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.05.004>
- Wang, H., Wang, S. H., Xu, Z. W., et al., 2018. Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf-O Isotopic Compositions of the Tiezhai Complex: Implications for Lithosphere Destruction of the North China Craton. *Gondwana Research*, 61: 203–221. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.04.020>
- Wang, L., Tang, H. Y., Wang, X., et al., 2024. The Cretaceous Volcanic Rocks in the Eastern North China Craton: Records of Heterogeneous Modification of Recycled Crustal Components. *Earth Science*, 49(2): 669–684(in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Wang, Z. C., Cheng, H., et al., 2020. Early Cretaceous Lamprophyre Dyke Swarms in Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton, and Implications for Mantle Metasomatism Related to Subduction. *Lithos*, 368: 105593. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105593>
- Wang, Y., Fan, H. R., Hu, F. F., et al., 2011. Zircon U-Pb Ages and Geochemistry of Elements and Isotopes of the Diorite from Tongjing, Yinan, Western Shandong Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 553–566(in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. C., Wang, Y., Wang, X., et al., 2021. Metasomatized Lithospheric Mantle and Gold Mineralization. *Earth Science*, 46(12): 4197–4229(in Chinese with English abstract).
- Wu, C., Chiaradia, M., Tang, G. J., et al., 2023. Crustal Control on the Petrogenesis of Adakite-Like Rocks. *Chemical Geology*, 632: 121548. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121548>
- Wu, F. Y., Yang, J. H., Xu, Y. G., et al., 2019. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47: 173–195. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060342>
- Wu, H. J., Liu, S. G., He, Y. S., et al., 2023. Mesozoic Slab-Derived Magmas from Mid-Eastern China: Responses to a Ridge-Transform Fault-Ridge Subduction System. *Chemical Geology*, 617: 121259. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.121259>
- Wu, X. Y., Xu, Y. G., Ma, J. L., et al., 2003. Geochemical Characteristics and Discussion of Mesozoic High-Mg Diorite Genesis in Western Shandong. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(03): 228–236(in Chinese).
- Xiong, L., Zhao, X. F., Zhao, S. R., et al., 2021. Formation of Giant Gold Provinces by Subduction-Induced Reactivation of Fossilized, Metasomatized Continental Lithospheric Mantle in the North China Craton. *Chemical Geology*, 580: 120362. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120362>
- Xu, W. L., Gao, S., Wang, Q. H., et al., 2006b. Mesozoic Crustal Thickening of the Eastern North China Craton: Evidence from Eclogite Xenoliths and Petrologic Implications. *Geology*, 34(9): 721. <https://doi.org/10.1130/g22551.1>
- Xu, W. L., Gao, S., Yang, D. B., et al., 2009. Geochemistry of Eclogite Xenoliths in Mesozoic Adakitic Rocks from Xuzhou-Suzhou Area in Central China and Their Tectonic Implications. *Lithos*, 107(3/4): 269–280. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.11.004>
- Xu, W. L., Hergt, J. M., Gao, S., et al., 2008. Interaction of Adakitic Melt-Peridotite: Implications for the High-Mg<sup>#</sup> Signature of Mesozoic Adakitic Rocks in the Eastern North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 265(1/2): 123–137. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.09.041>
- Xu, W. L., Wang, D. Y., Wang, Q. H., et al., 2004. The Metasomatic Process of Siliceous Melts (flows) in the Ultramafic Xenoliths of Lu Xi: Implications for the Thinning of the Mesozoic lithospheric mantle. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 72–80(in Chinese).
- Xu, W. L., Wang, Q. H., Liu, X. C., et al., 2004. Chronology and Sources of Mesozoic Intrusive Complexes in the Xuzhou-Huainan Region, Central China: Constraints from SHRIMP Zircon U-Pb Dating. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 78(1): 96–106. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2004.tb00679.x>
- Xu, W. L., Wang, Q. H., Wang, D. Y., et al., 2006a. Mesozoic Adakitic Rocks from the Xuzhou-Suzhou Area, Eastern China: Evidence for Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(4): 454–464. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2005.03.010>

- Xu, W. L., Yang, C. H., Yang, D. B., et al., 2006. Mesozoic High-Mg Diorites in Eastern North China Craton: Constraints on the Mechanism of Lithospheric Thinning. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 120–129(in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., Huang, X. L., Ma, J. L., et al., 2004b. Crust-Mantle Interaction during the Tectono-Thermal Reactivation of the North China Craton: Constraints from SHRIMP Zircon U-Pb Chronology and Geochemistry of Mesozoic Plutons from Western Shandong. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147(6): 750–767. <https://doi.org/10.1007/s00410-004-0594-y>
- Xu, Y. G., Ma, J. L., Huang, X. L., et al., 2004a. Early Cretaceous Gabbroic Complex from Yinan, Shandong Province: Petrogenesis and Mantle Domains beneath the North China Craton. *International Journal of Earth Sciences*, 93(6): 1025–1041. <https://doi.org/10.1007/s00531-004-0430-7>
- Yang, C. H., Xu, W. L., Yang, D. B., et al., 2006. Petrogenesis of Mesozoic High-Mg Diorites in Western Shandong: Evidence from Chronology and Petro-Geochemistry. *Earth Science*, 16(4): 297–308(in Chinese with English abstract).
- Yang, C. H., Xu, W. L., Yang, D. B., et al., 2008. Petrogenesis of Shangyu Gabbro-Diorites in Western Shandong: Geochronological and Geochemical Evidence. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(4): 481–492. <https://doi.org/10.1007/s11430-008-0029-0>
- Yang, D. B., Xu, W. L., Pei, F. P., et al., 2008. Chronology and Pb Isotope Compositions of Early Cretaceous Adakitic Rocks in Xuzhou-Huaipei Area, Central China: Constraints on Magma Sources and Tectonic Evolution in the Eastern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1745–1758(in Chinese with English abstract).
- Yang, D. B., Xu, W. L., Pei, F. P., et al., 2012. Spatial Extent of the Influence of the Deeply Subducted South China Block on the Southeastern North China Block: Constraints from Sr-Nd-Pb Isotopes in Mesozoic Mafic Igneous Rocks. *Lithos*, 136: 246–260. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.06.004>
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S. A., 2003. A Review of the Geodynamic Setting of Large-Scale Late Mesozoic Gold Mineralization in the North China Craton: an Association with Lithospheric Thinning. *Ore Geology Reviews*, 23(3/4): 125–152. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(03\)00033-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(03)00033-7)
- Yang, J. H., Xu, L., Sun, J. F., et al., 2021. Geodynamics of Decratonization and Related Magmatism and Mineralization in the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 64(9): 1409–1427. <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9732-6>
- Yang, J. H., Xu, L., Sun, J. F., et al., 2021. Geodynamics of Decratonization and Related Magmatism and Mineralization in the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 64(9): 1409–1427. <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9732-6>
- Yang, Q. L., 2013. A Geochemical Study of Early Cretaceous Mafic Intrusions in the Southeastern North China Block (Dissertation). University of Science and Technology of China, Hefei(in Chinese with English abstract).
- Yang, Q. L., Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., 2012. Slab-Mantle Interaction in Continental Subduction Channel: Geochemical Evidence from Mesozoic Gabbroic Intrusives in Southeastern North China. *Lithos*, 155: 442–460. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.10.003>
- Yue, N., Liu, X., Zhang, Q. M., et al., 2020. Genesis of Diorite Porphyry in the Shaxi Porphyry Cu(Au) Orefield. *Geological Journal of China Universities*, 26 (5): 506–519 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Zhu, R. X., Liu, J. M., et al., 2003. The Key Time Point for the Transformation of the Mesozoic Tectonic Regime in the Eastern Part of North China. *Science in China(Series D)*, 33 (10): 913–920(in Chinese).
- Zhang, C., Cui, F. H., Zhang, Z. L., et al., 2017. Petrogenesis of Ore-Bearing Dioritic Pluton in Jinling Area in Western Shandong: Evidence from Zircon U-Pb Chronology and Petro-Geochemistry. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47(6): 1732–1745(in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Ma, C. Q., Holtz, F., et al., 2013. Mineralogical and Geochemical Constraints on Contribution of Magma Mixing and Fractional Crystallization to High-Mg Adakite-Like Diorites in Eastern Dabie Orogen, East China. *Lithos*, 172: 118–138. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.04.011>
- Zhang, H. F., Sun, M., Zhou, M. F., et al., 2004. Highly Heterogeneous Late Mesozoic Lithospheric Mantle beneath the North China Craton: Evidence from Sr-Nd-Pb Isotopic Systematics of Mafic Igneous Rocks. *Geological Magazine*, 141(1): 55–62. <https://doi.org/10.1017/S0016756803008331>
- Zhang, W. Q., Zhang, Z. L., Zhang, Y. M., et al., 2022. Petrogenesis of the Diorite Rocks in Western Shandong: Evidence from Geochronology, Petrogeochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 57(2): 564–586(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Zhang, X., Yang, X. Y., Pirajno, F., 2017. Recycling of Palaeo-Pacific Subducted Oceanic Crust Related to a Fe-Cu-Au Mineralization in the Xu-Huai Region of North Anhui-Jiangsu, East China: Geochronological and Geochemical Constraints. *International Geology Review*, 60(11/12/13/14): 1621–1643. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1392904>
- Zhao, Z. F., Dai, L. Q., Zheng, Y. F., 2013. Postcollisional Mafic Igneous Rocks Record Crust-Mantle Interaction during Continental Deep Subduction. *Scientific Reports*, 3: 3413. <https://doi.org/10.1038/srep03413>
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., 2009. Subduction of Continental Lithosphere Remelting: The Genesis of Mesozoic Magmatic Rocks in the Dabie-Sulu Orogenic Belt. *Science in China(Series D)*, 39(7): 888–909(in Chinese).
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Wei, C. S., et al., 2011. Origin of Postcollisional Magmatic Rocks in the Dabie Orogen: Implications for Crust-Mantle Interaction and Crustal Architecture. *Lithos*, 126(1/2): 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.06.010>
- Zhao, Z. X., Liang, S. N., 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: 105487. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105487>
- Zheng, S., An, Y. F., Lai, C., et al., 2021. Genesis of High-Mg Adakites in the Southeastern Margin of North China Craton: Geochemical and U-Pb Geochronological Perspectives. *Frontiers in Earth Science*, 9: 731233. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.731233>
- Zhou, H., Shang, D. F., Chan, S. W., et al., 2019. Zircon U-Pb Dating, Petrogenesis and Geological Significance of the Banjing Pluton in Xuhuai Area. *Mineralogy and Petrology*, 39(3): 9–16(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Q. J., Xu, W. L., Wang, Q. H., et al., 2014. Petrogenesis of Olivine-Bearing Clinopyroxenite Xenolith in Early Cretaceous Adakitic Rocks from Xuhuai Area in Eastern China and Its Petrologic Implication. *Earth Science*, 39(2): 141–154(in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Chen, L., Wu, F. Y., et al., 2011. Timing, Scale and Mechanism of the Destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 54(6): 789–797. <https://doi.org/10.1007/s11430-011-4203-4>
- Zhu, R. X., Yang, J. H., Wu, F. Y., 2012. Timing of Destruction of the North China Craton. *Lithos*, 149: 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.013>
- Zi, F., He, G. Y., Dai, S. Q., et al., 2007. Liguó Early Cretaceous High-Mg Adakitic Intrusive Rocks in the Xuzhou Region: Petrogenesis and Implications for Geodynamics and Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2857–2868(in Chinese with English abstract).

## 中文参考文献

- 白兴卫, 周虎, 刘忠媛, 等, 2024. 柴北缘都兰地区志留纪高镁闪长岩的成因及其动力学背景: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Hf 同位素的制约. *矿物岩石*, 44(3): 25–38.
- 产思维, 张家嘉, 顾大年, 2022. 华北陆块东南缘徐淮地区侵入岩岩石组合及时空分布. *地质学刊*, 46(3): 237–244.
- 陈斌, 陈长健, 贺敬博, 等, 2013. 华北东部中生代高镁埃达克质岩浆的起源: 岩石学和 Nd-Sr-Os 同位素证据. *科学通报*, 58(20): 1941–1953.
- 陈应华, 蓝廷广, 王洪, 等, 2017. 淄博—莱芜地区矽卡岩型磁铁矿 LA-ICP-MS 微量元素分析. 北京: 第八届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会.
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等, 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 33(10): 913–920.
- 高继雷, 周永刚, 张振飞, 等, 2021. 华北克拉通东缘金岭杂岩体岩浆源区及构造背景: 来自岩相学、岩石地球化学及年代学的证据. *地质科学*, 56(1): 253–271.
- 高明波, 高继雷, 张永明, 等, 2022. 鲁西莱芜矿山岩体杂岩体源区及成因: 地球化学、Sr-Nd-Pb 及锆石 Hf 同位素约束. *矿物岩石地球化学通报*, 41(2): 287–306.
- 高明波, 高继雷, 张永明, 等, 2022. 鲁西沂南地区早白垩世侵入岩成因及对壳幔作用过程的约束. *地球科学与环境学报*, 44(5): 723–749.
- 郭军, 黄小龙, 贺鹏丽, 等, 2023. 鲁西地区中生代高镁闪长岩角闪石成分变化特征及其对矽卡岩型铁矿成矿作用的启示. *大地构造与成矿学*, 48(4): 800–819.
- 郭谱, 2014. 鲁西中生代金成矿的地球动力学背景研究(博士学位论文), 北京: 中国地质大学.
- 郭泳杰, 2019. 宁镇地区岩体地球化学研究(硕士学位论文), 合肥: 合肥工业大学.
- 胡华斌, 毛景文, 刘敦一, 等, 2004. 鲁西铜石岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. *地学前缘*, 11(2): 453–460.
- 霍腾飞, 杨德彬, 师江朋, 等, 2018. 徐淮地区早白垩世丰山和蔡山高镁埃达克质岩: 拆沉下地壳熔融的熔体与地幔橄榄岩的反应. *岩石学报*, 34(6): 1669–1684.
- 李承东, 张旗, 苗来成, 等, 2004. 冀北中生代高 Sr 低 Y 和低 Sr 低 Y 型花岗岩: 地球化学、成因及其与成矿作用的关系. *岩石学报*, 20(2): 269–284.
- 李三忠, 索艳慧, 李玺瑶, 等, 2018. 西太平洋中生代板块俯冲过程与东亚洋陆过渡带构造—岩浆响应. *科学通报*, 63

- (16): 1550—1593.
- 李曙光, 杨蔚, 2002. 大别造山带深部地缝合线与地表地缝合线的解耦及大陆碰撞岩石圈楔入模型: 中生代幔源岩浆岩 Sr-Nd-Pb 同位素证据. 科学通报, 47(24): 1898—1905.
- 宁培松, 龙群, 程婷, 等, 2013. 鲁西地块晚中生代中—基性岩地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素组成特征. 地球科学与环境学报, 35(4): 62—76.
- 庞崇进, 2015. 华北克拉通东部白垩纪中基性火山岩的年代学和地球化学特征(博士学位论文), 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所).
- 宋明春, 李杰, 周建波, 等, 2020. 胶东早白垩世高镁闪长岩类的发现及其构造背景. 岩石学报, 36(1): 279—296.
- 田忠华, 王伟, 刘平华, 2022. 中国东部新太古代末期构造演化: 来自古老陆核构造恢复的启示. 岩石矿物学杂志, 41(4): 681—694.
- 汪浪, 汤华云, 汪翔, 等, 2024. 华北克拉通东部早白垩世火山岩: 再循环物质差异性改造的记录. 地球科学, 49(2): 669—684.
- 汪在聪, 王焰, 汪翔, 等, 2021. 交代岩石圈地幔与金成矿作用. 地球科学, 46(12): 4197—4229.
- 王永, 范宏瑞, 胡芳芳, 等, 2011. 鲁西沂南铜井闪长质岩体锆石 U-Pb 年龄、元素及同位素地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 30(4): 553—566.
- 巫祥阳, 徐义刚, 马金龙, 等, 2003. 鲁西中生代高镁闪长岩的地球化学特征及其成因探讨. 大地构造与成矿学, 27(3): 228—236.
- 许文良, 王冬艳, 王清海, 等, 2004. 鲁西纯橄岩捕虏体中富硅质熔(流)体的交代作用: 对中生代岩石圈地幔减薄的意义. 地质学报, 78(1): 72—80.
- 许文良, 杨承海, 杨德彬, 等, 2006. 华北克拉通东部中生代高 Mg 闪长岩: 对岩石圈减薄机制的制约. 地学前缘, 13(2): 120—129.
- 杨承海, 许文良, 杨德彬, 等, 2006. 鲁西中生代高 Mg 闪长岩的成因: 年代学与岩石地球化学证据. 地球科学, 31(1): 81—92.
- 杨承海, 许文良, 杨德彬, 等, 2008. 鲁西上峪辉长—闪长岩的成因: 年代学与岩石地球化学证据. 中国科学(D辑: 地球科学), 38(1): 44—55.
- 杨德彬, 许文良, 裴福萍, 等, 2008. 徐淮地区早白垩世 adakitic 岩石的年代学和 Pb 同位素组成: 对岩浆源区与华北克拉通东部构造演化的制约. 岩石学报, 24(8): 1745—1758.
- 杨进辉, 许蕾, 孙金凤, 等, 2021. 华北克拉通破坏与岩浆—成矿的深部动力学过程. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1401—1419.
- 杨青亮, 2013. 华北陆块东南缘早白垩世基性侵入岩地球化学研究(博士学位论文), 合肥: 中国科学技术大学.
- 岳娜, 刘鑫, 张千明, 等, 2020. 安徽沙溪斑岩铜(金)矿区闪长斑岩形成机制. 高校地质学报, 26(5): 506—519.
- 张超, 崔芳华, 张照录, 等, 2017. 鲁西金岭地区含矿闪长岩体成因: 来自锆石 U-Pb 年代学和地球化学证据. 吉林大学学报(地球科学版), 47(6): 1732—1745.
- 张伟强, 张照录, 张永明, 等, 2022. 鲁西地区闪长质岩石的成因: 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素的证据. 地质科学, 57(2): 564—586.
- 赵子福, 郑永飞, 2009. 俯冲大陆岩石圈重熔: 大别—苏鲁造山带中生代岩浆岩成因. 中国科学(D辑: 地球科学), 39(7): 888—909.
- 周虎, 尚德锋, 产思维, 等, 2019. 徐淮地区斑岩体锆石 U-Pb 测年、岩石成因及其地质意义. 矿物岩石, 39(3): 9—16.
- 周群君, 许文良, 王清海, 等, 2014. 徐淮早白垩世埃达克质岩中含橄榄石单斜辉石岩的成因及其岩石学意义. 地球科学, 39(2): 141—154.
- 资锋, 何光玉, 戴圣潜, 等, 2007. 徐州利国早白垩世高镁埃达克质侵入岩的成因及其动力学、成矿意义. 岩石学报, 23(11): 2857—2868.