

唐正坤,焦建刚,马云飞,等. 内蒙古北山地区尖山镁铁—超镁铁质岩体形成时代与岩石成因[J]. 地球科学与环境学报, 2026, 48(1): 20-38.

TANG Zheng-kun, JIAO Jian-gang, MA Yun-fei, et al. Formation Age and Petrogenesis of the Jianshan Mafic-ultramafic Intrusion in the Beishan Area of Inner Mongolia, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2026, 48(1): 20-38.

DOI: 10.19814/j.jese.2025.09030

## 内蒙古北山地区尖山镁铁—超镁铁质岩体 形成时代与岩石成因

唐正坤<sup>1</sup>, 焦建刚<sup>1,2,3\*</sup>, 马云飞<sup>1,4</sup>, 李林娜<sup>1</sup>, 贾永琦<sup>4</sup>, 王佳新<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学 西安市关键金属成矿与高效利用重点实验室, 陕西 西安 710054; 4. 中国建筑材料工业地质勘查中心内蒙古总队, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:** 内蒙古北山地区位于中亚造山带东段, 是研究古亚洲洋闭合与陆壳增生的关键区, 针对尖山镁铁—超镁铁质岩体开展研究对理解区域构造-岩浆演化及开展铜镍找矿具有重要意义。为厘定其形成时代、岩石成因及构造背景, 综合开展了岩石学、全岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素研究。结果表明: 尖山地区橄榄辉长岩的结晶年龄为  $(363.9 \pm 1.8)$  Ma, 指示其形成于晚泥盆世; 角闪辉长岩和橄榄辉长岩具有低  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  含量, 高  $\text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量的特征, 球粒陨石标准化稀土元素配分模式表现为明显的轻稀土元素 (LREE) 富集与重稀土元素 (HREE) 亏损的右倾型, 原始地幔标准化微量元素蛛网图表现为 Nb、Ta、Zr、Ti 等高场强元素 (HFSE) 亏损, Sr、Ba 等大离子亲石元素 (LILE) 富集, 结合较高的 Rb/Y 值、Ba/La 值以及正的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值 (1.65~6.46) 可知, 其母岩浆源区为受到俯冲板片流体交代的亏损地幔。综上所述, 尖山镁铁—超镁铁质岩体的岩浆形成于晚泥盆世板块俯冲背景下, 地幔源区受到俯冲流体交代, 并在岩浆上升过程中经历了结晶分异及不同程度的地壳混染作用。

**关键词:** 地球化学; 形成时代; 岩石成因; 镁铁—超镁铁质岩体; 岩浆源区; 构造背景; 内蒙古

**中图分类号:** P581; P597+.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-6561(2026)01-0020-19

## Formation Age and Petrogenesis of the Jianshan Mafic-ultramafic Intrusion in the Beishan Area of Inner Mongolia, China

TANG Zheng-kun<sup>1</sup>, JIAO Jian-gang<sup>1,2,3\*</sup>, MA Yun-fei<sup>1,4</sup>, LI Lin-na<sup>1</sup>,  
JIA Yong-qi<sup>4</sup>, WANG Jia-xin<sup>1</sup>

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Xi'an Key Laboratory for Mineralization and Efficient Utilization of Critical Metals, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Inner Mongolia Branch of China National Geological Exploration Center of Building Materials Industry, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

收稿日期: 2025-09-24; 修回日期: 2025-12-19 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (92162213); 内蒙古自治区地质勘查基金项目 (2020-KY05)

\* 通信作者: 焦建刚 (1976-), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: jiangang@chd.edu.cn.

**Abstract:** The Beishan area in Inner Mongolia, China, located in the eastern Central Asian orogenic belt, is a critical area for studying the closure of the Paleo-Asian ocean and continental crustal growth. Investigating the mafic-ultramafic intrusions in the Jianshan area is significant for understanding regional tectonic-magmatic evolution and provides insights for Cu-Ni mineral exploration. To constrain their formation age, petrogenesis, and tectonic setting, a comprehensive study on the Jianshan mafic-ultramafic intrusions was conducted, integrating petrography, whole-rock geochemistry, zircon U-Pb geochronology, and Hf isotopes. The results show that: zircon U-Pb dating of olivine gabbro from the Jianshan area yields a crystallization age of  $(363.9 \pm 1.8)\text{Ma}$ , indicating formation during the Late Devonian; geochemically, the hornblende gabbro and olivine gabbro are characterized by low  $\text{SiO}_2$  and  $\text{TiO}_2$  contents, and high  $\text{MgO}$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3^\dagger$  contents; they exhibit right-inclined chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns with marked light rare earth element (LREE) enrichment and heavy rare earth element (HREE) depletion; on primitive mantle-normalized trace element spider diagrams, they show negative anomalies in high field strength element (HFSE; e. g., Nb, Ta, Zr, Ti) and large ion lithophile element (LILE; e. g., Sr, Ba), high Rb/Y and Ba/La ratios, and depleted Hf isotopic compositions ( $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 1.65 - 6.46$ ). These characteristics suggest that the parental magma is derived from a depleted mantle source metasomatized by subduction-related fluids. Therefore, the Jianshan mafic-ultramafic intrusions are interpreted to have formed in a Late Devonian subduction setting, with mantle sources metasomatized by slab-derived fluids, followed by fractional crystallization and varying degrees of crustal contamination during magma ascent. This study provides new evidence for the Late Paleozoic tectonic-magmatic evolution of the Beishan orogenic belt and offers important theoretical and predictive constraints for regional Cu-Ni mineral exploration.

**Key words:** geochemistry; formation age; petrogenesis; mafic-ultramafic intrusion; magma source; tectonic setting; Inner Mongolia

## 0 引 言

北山造山带位于中亚造山带东段,是连接哈萨克斯坦板块、塔里木板块与中朝板块的重要结合带,其构造拼贴与岩浆演化历史在中亚造山带多期陆壳增生过程中占据关键地位<sup>[1-6]</sup>。近年来,随着区域地质调查与岩石学、地球化学以及年代学研究的不断深入,学界对于该区域晚古生代的构造-岩浆演化历史的复杂性认识不断加深,特别是泥盆纪阶段的构造属性、岩浆活动机制及其成因背景认识仍然存在显著争议。

关于北山造山带构造属性,目前主要存在两种观点:一是将其视为哈萨克斯坦板块与塔里木板块之间的构造结合部,泥盆纪岩浆岩形成于古亚洲洋俯冲、碰撞背景<sup>[1,7]</sup>;二是认为其属于塔里木板块北缘活动带,岩浆作用主要与塔里木板块北缘的陆壳伸展、俯冲等相关<sup>[8-9]</sup>。两者在界线划分及构造属性认知上存在明显差异。此外,关于北山地区泥盆纪

岩浆活动机制与成因背景也存在争议:一种观点认为,泥盆纪镁铁—超镁铁质岩体与中酸性花岗岩体形成于古亚洲洋俯冲作用下的弧相关构造环境,岩浆源区为受俯冲流体改造的亏损地幔<sup>[10-11]</sup>;另一种观点认为,泥盆纪镁铁—超镁铁质岩体的形成与俯冲后伸展或者岩石圈拆沉作用相关<sup>[12]</sup>。因此,北山地区泥盆纪岩浆作用的动力学机制及其构造属性仍存在较大争议。

内蒙古—甘肃北山地区发育大量镁铁—超镁铁质岩体,主要分布于构造交汇部位,具有良好的铜镍硫化物成矿潜力。厘定这些岩体的形成时代、岩石成因与成岩构造背景,对于解析区域构造-岩浆演化过程、明确北山造山带构造单元划分以及评价其铜镍成矿前景具有重要的理论意义与勘查指导价值,可为区域找矿突破提供科学依据。北山地区黑山铜镍矿床的岩石组合、年代学特征及成矿模式已成为该区晚古生代岩浆-成矿演化研究的典型,目前已有大量成果发表<sup>[13-15]</sup>。研究表明:北山地区黑山铜镍

矿区的成矿角闪辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为  $(374.6 \pm 5.2)$  Ma, 橄榄角闪辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为  $(367.4 \pm 5.4)$  Ma, 辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为  $(356.4 \pm 0.6)$  Ma, 表明其铜镍成矿作用集中在晚泥盆世—早石炭世 (376~355 Ma)。相比之下, 区域内新疆天山—北山成矿带部分铜镍矿床的形成时代主要集中在晚石炭世—早二叠世 (300~280 Ma)<sup>[16-18]</sup>, 显示出北山造山带的铜镍成矿时代与岩浆事件之间存在明显时空不一致性。这也表明北山地区在晚古生代经历了多期、多阶段、多成因机制的构造-岩浆演化事件, 区域成矿作用与构造背景密切相关。

内蒙古北山地区尖山镁铁—超镁铁质岩体与位于其西段的甘肃黑山大型铜镍矿床处于同一成矿带, 两者在岩石组合、成岩地质背景等方面具有明显的相似性, 因而尖山镁铁—超镁铁质岩体的铜镍成矿潜力备受关注。目前, 尖山镁铁—超镁铁质岩体的形成时代、岩石成因与成岩构造背景等仍缺乏系统研究。基于此, 本文在综合岩石学、地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成研究的基础上, 厘定尖山镁铁—超镁铁质岩体的形成时代与地质背景, 探讨其岩石成因与构造意义, 并与黑山地区铜镍成矿相关的镁铁—超镁铁质岩体进行对比, 以期揭示北山造山带晚古生代构造-岩浆演化历史, 并为区域铜镍成矿预测与找矿勘查提供理论支持与科学依据。

## 1 区域地质背景

内蒙古尖山地区位于北山造山带东段, 北接明水—石板井—小黄山构造带, 南邻红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿混杂岩带 (图 1)。自古生代以来, 该地区经历了多期板块俯冲-碰撞造山作用及碰撞后伸展等构造叠加作用, 构造演化过程复杂, 记录了典型的多期、多阶段构造叠加特征<sup>[19-23]</sup>。区内构造发育, 主要断裂以 NW 向为主, 为华力西晚期构造活动的产物, 后期受燕山期 NE 向左行走滑断裂的切割与错移作用影响, 局部构造格局发生明显调整, 表现出明显的多期活动和继承性叠加特征<sup>[18, 24-25]</sup>。

研究区地层出露不完整, 分布较零星, 并以红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿混杂岩带为界分为两部分。北部主要出露马鬃山地区分区的古元古界北山岩群及奥陶系—志留系公婆泉组。其中, 北山岩群为区内最古老的变质结晶基底, 主要由低角闪岩—高绿片岩相变质岩系组成, 并受后期断裂构造及古生

代岩浆活动的影响与改造, 呈 NEE 向断块状展布, 表现出明显的构造拆离特征。公婆泉组则为一套绿片岩相的中—基性火山岩夹碎屑岩、碳酸盐岩的变质建造, 显示出典型的岛弧或弧后盆地沉积环境与构造背景。南部主要出露红柳河地区分区的中—新元古代滨浅海相碎屑岩和碳酸盐岩沉积组合以及早古生代深水海相硅质岩、碎屑岩和少量火山碎屑岩。中生代以来, 尖山地区进入盆地沉降阶段, 形成了一套非变质的陆相沉积地层序列, 主要包括下白垩统赤金堡组碎屑岩建造, 由砾岩、砂岩、砂质泥岩夹泥灰岩及煤层 (线) 组成; 新生代出露有上新统苦泉组与全新统松散—半固结堆积层, 反映出逐渐稳定的构造背景与沉积环境的演变过程<sup>[26]</sup>。

研究区岩浆活动频繁, 是北山造山带东段岩浆岩系的重要组成部分。侵入岩主要集中分布于红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿混杂岩带北部, 表现出明显的构造控制特征。岩体形成时代从早古生代延续至中生代, 岩性组合以中酸性侵入岩为主, 包括花岗岩、二长花岗岩等, 同时发育一系列镁铁—超镁铁质岩体, 如辉长岩、角闪辉长岩和橄榄岩等。岩体总体呈 NW 向及近 EW 向展布, 与区域主要构造体系方向一致, 反映出构造-岩浆耦合演化的过程<sup>[27-31]</sup> (图 1)。

## 2 岩体地质与岩相学特征

尖山镁铁—超镁铁质岩体位于北山造山带东段, 主要呈小岩株、岩脉状产出, 主要由角闪辉长岩、橄榄辉长岩等多个侵入相组成, 不同侵入相之间呈突变或渐变关系。岩体风化、蚀变较强, 发育球形风化, 见蛇纹石化、透闪石化、绿泥石化。岩体围岩主要为上奥陶统—下志留统公婆泉组绿帘角闪片岩和上泥盆统花岗闪长岩—石英闪长岩 (图 2)。

角闪辉长岩呈暗灰色, 具辉长结构、块状构造 [图 3(a)]。主要矿物组成为辉石 (体积分数为 45%~50%)、角闪石 (10%~15%)、斜长石 (25%~35%) [图 3(b)], 次要矿物为黑云母 (小于 5%)。岩石中金属矿物体积分数为 5%~10%, 主要为钛铁矿、磁铁矿 [图 3(c)]。辉石呈柱状, 长径为 0.4~1.0 mm, 蚀变强烈, 蚀变类型主要有角闪石化、绿泥石化, 可见残余辉石; 角闪石具有淡绿色—浅绿色弱多色性, 粒径为 0.1~1.0 mm, 并与辉石紧密共生; 斜长石呈半自形板条状, 具有明显的聚片双晶和卡钠双晶, 部分发生绢云母化。

橄榄辉长岩呈暗灰色, 具辉长结构、块状构造

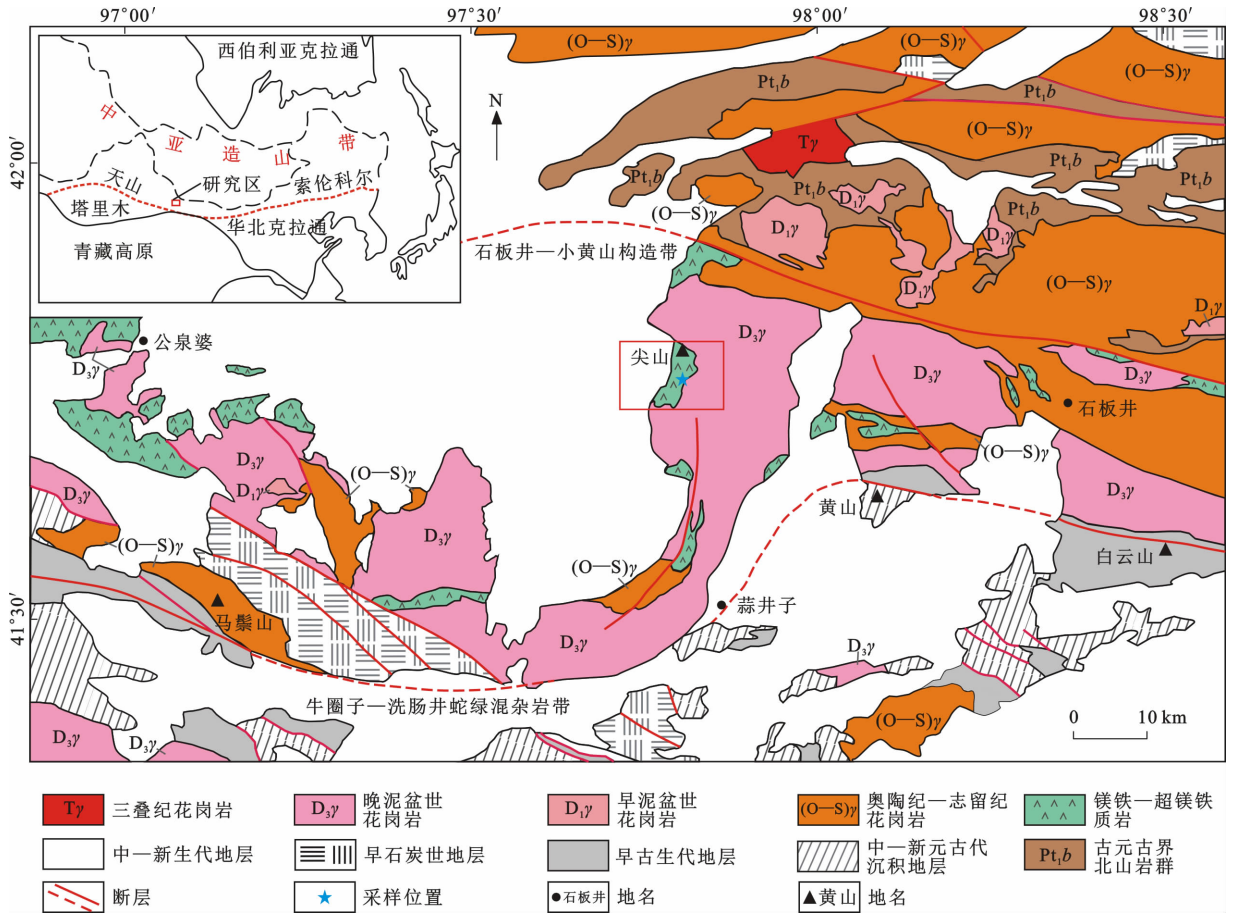


Fig. 1 Simplified Geological Map of the Beishan Area in Inner Mongolia

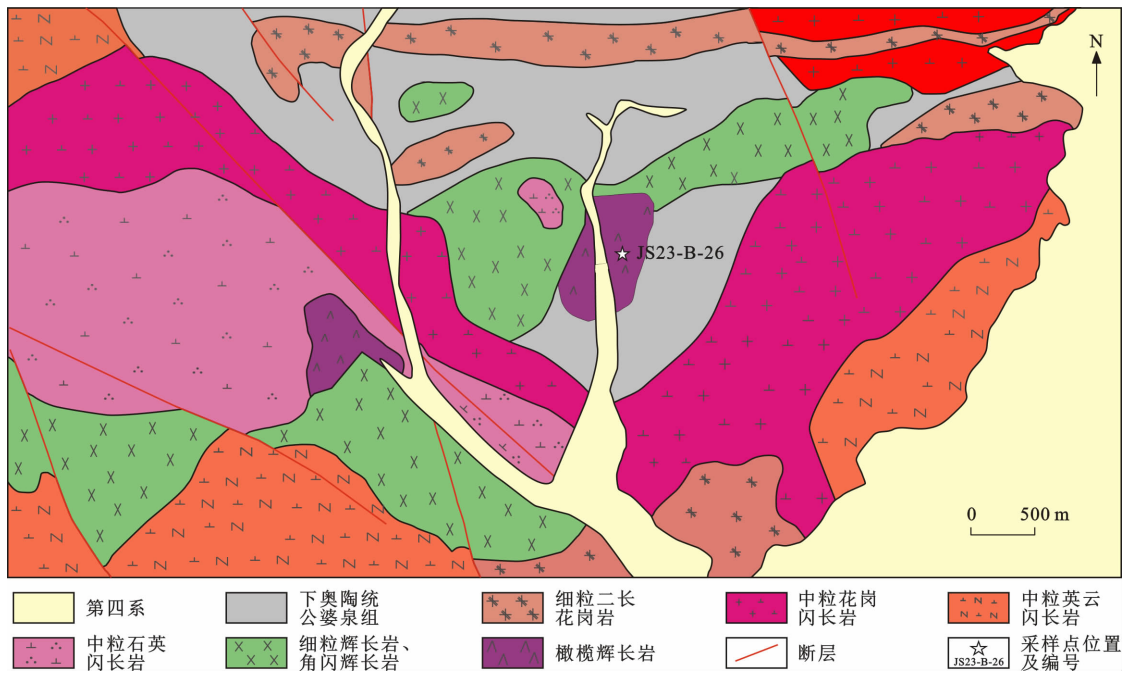
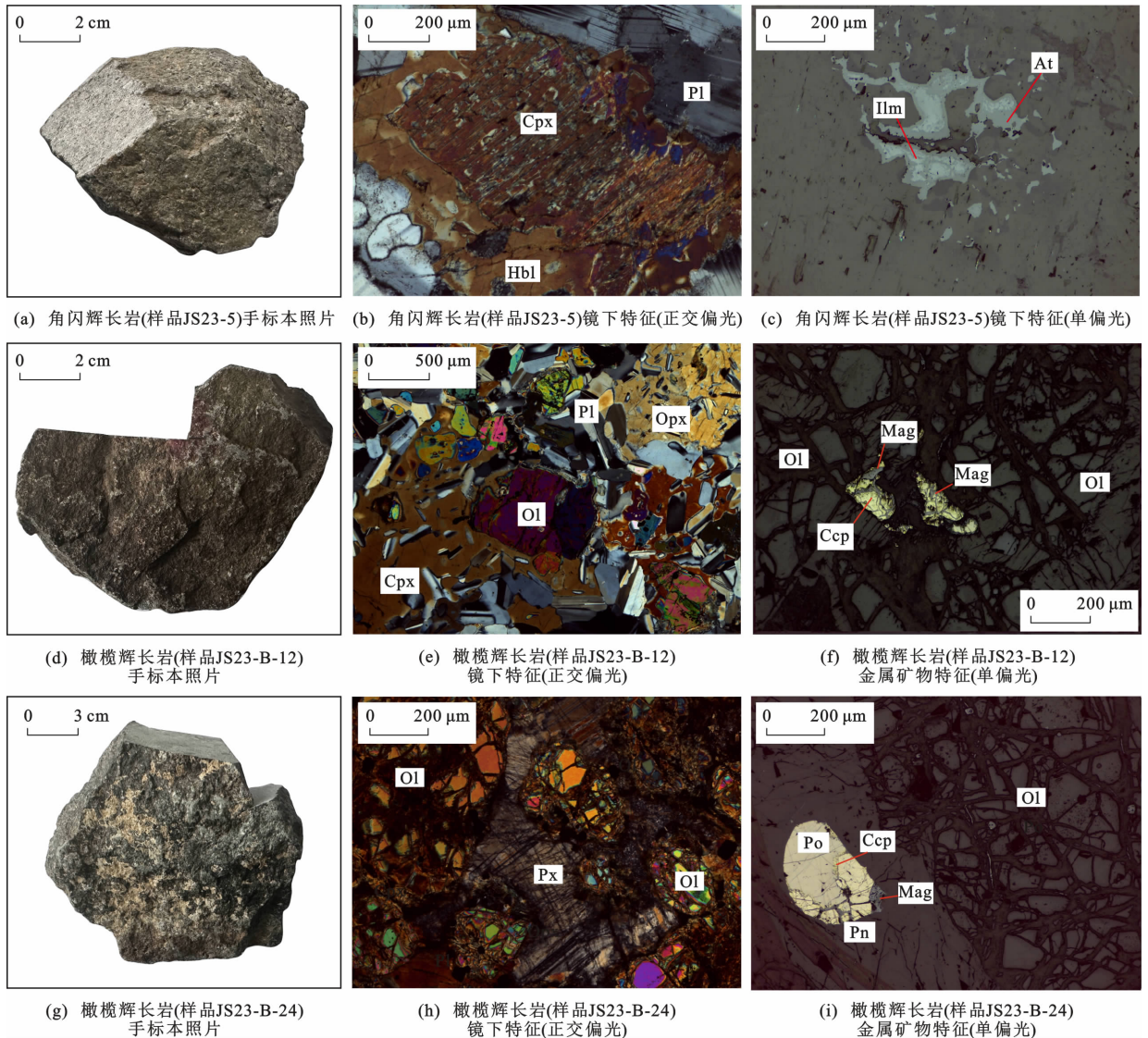


Fig. 2 Simplified Geological Map of the Jianshan Area and the Sampling Location



Ol 为橄榄石; Opx 为斜方辉石; Cpx 为单斜辉石; Hbl 为角闪石; Pl 为斜长石; Mag 为磁铁矿; Ccp 为黄铜矿; Po 为磁黄铁矿; Pn 为镍黄铁矿; Ilm 为钛铁矿; At 为金红石; Px 为辉石

图 3 角闪辉长岩及橄榄辉长岩手标本及镜下照片

Fig. 3 Hand Specimens and Photomicrographs of Hornblende Gabbro and Olivine Gabbro

[图 3(d)、(g)]。主要矿物组成为辉石(体积分数为 45%~50%)、橄榄石(15%~20%)、斜长石(25%~30%),次要矿物组成为黑云母(<5%) [图 3(e)、(h)],还含少量金属矿物,包括磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿 [图 3(f)、(i)]。橄榄石呈自形一半自形近六边形或方形粒状,粒径为 0.1~0.2 mm,具正高突起,表面裂隙发育,可见橄榄石包裹于辉石中成包橄结构。辉石呈柱状,部分切面呈六边形,长边为 0.4~1.0 mm。其中,斜方辉石为淡红色—浅绿色多色性,一级灰干涉色;单斜辉石无多色性,二级蓝绿干涉色。辉石中可见橄榄石和长石晶体形成包橄含长结构。斜长石呈半自形板条状,可见明显的聚片双晶和卡钠复合双晶,部分发生绢云母化。

### 3 分析方法

本次研究样品来自内蒙古北山地区尖山镁铁—超镁铁质岩体野外露头,其中锆石采样位置为(41°42'19.16"N,97°52'23.19"E)。样品的岩石地球化学分析在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成。主量元素分析采用 X 射线荧光光谱法完成,测试仪器为日本岛津 1800 型 X 荧光光谱仪。微量和稀土元素分析采用酸溶法完成,测试仪器为 Finnigan Element 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)仪,仪器型号为 Thermo-X7 型 ICP-MS。

锆石的挑选工作由河北省廊坊市峰泽源岩矿检

测技术有限公司完成。首先,将样品粉碎至 300  $\mu\text{m}$  左右,经淘洗、重选富集,再经磁选和密度分选后,在双目镜下进一步挑选出晶型完好、透明度和色泽度较好的锆石颗粒;然后,用环氧树脂将锆石粘贴于样品靶上,进行打磨和抛光,使锆石露出新鲜截面;最后,对锆石靶进行阴极发光(Cathodoluminescence, CL)、透射光和反射光照相,据此选择并标记合适的锆石位置进行 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析。

锆石 U-Pb 年代学测试在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成,使用仪器为美国 Photon Machines 公司 Analyte Excite 193 nm 型气态准分子激光剥蚀系统与美国 Agilent(安捷伦)公司 7700x 型电感耦合等离子体质谱仪联机。锆石 U-Pb 定年采用 91500 为外标,锆石微量元素分析采用 NIST610 为外标,采用内标元素<sup>91</sup>Zr 进行定量计算,数据处理、年龄计算和绘图使用 ICPMS-DataCall 软件<sup>[33]</sup>和 Isoplot 3.00 软件<sup>[34]</sup>完成。

在完成锆石 U-Pb 年龄测试的基础上,从样品中选择谐和度较高的锆石颗粒进行 Hf 同位素组成分析,相关测试工作在中国地质调查局西安地质调查中心自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成。测试仪器为 Geolas Pro 型激光剥蚀系统及 Neptune Plus 型多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)仪,使用氦气作为剥蚀物质载气,激光剥蚀束斑直径为 44  $\mu\text{m}$ ,激光剥蚀频率为 8 Hz。标样 GJ-1 的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 加权平均值为 0.282 007 ± 0.000 025(误差类型为 1 $\sigma$ ),计算初始<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 值时采用的 Lu 衰变常数为  $1.867 \times 10^{-11} \text{年}^{-1}$ <sup>[35]</sup>。锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值基于 U-Pb 年龄获得,计算时采用球粒陨石的<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 值(0.033 600)和<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 值(0.282 785)<sup>[36]</sup>。计算锆石 Hf 单阶段模式年龄( $T_{\text{DM1}}$ )时采用亏损地幔的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 值(0.282 325)和<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 值(0.038 400)<sup>[37]</sup>。

## 4 结果分析

### 4.1 锆石 U-Pb 年龄特征

本次研究选择内蒙古北山地区尖山镁铁—超镁铁质岩体的 1 件橄榄辉长岩(样品编号为 JS23-B-26)进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,分析结果如表 1 所示。

阴极发光图像(图 4)显示,所选橄榄辉长岩样品中的锆石主要呈半自形—他形柱状晶体,长 100~200  $\mu\text{m}$ ,长宽比为 1:1~3:1。晶体内部发育清晰的岩浆震荡环带,显示出良好的岩浆锆石生长特征

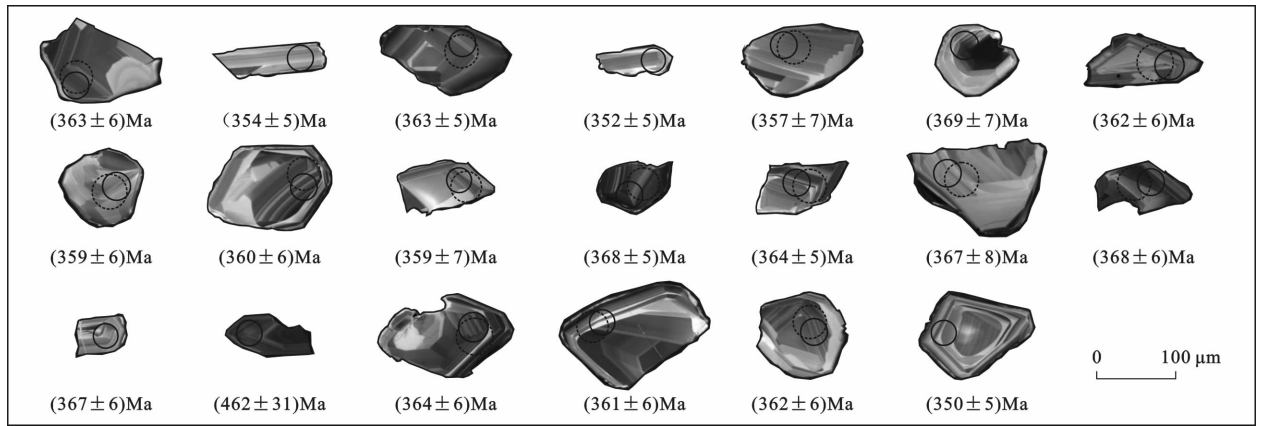
(图 4)。由表 1 可知,锆石 U 含量(质量分数,下同)为  $(120.50 \sim 2476.82) \times 10^{-6}$ ,Th 含量为  $(69.37 \sim 812.45) \times 10^{-6}$ ,Pb 含量为  $(6.87 \sim 145.00) \times 10^{-6}$ ,Th/U 值为 0.17~1.26,平均值为 0.76。锆石 Th/U 值较高,结合环带特征与晶体形态,表明橄榄辉长岩样品中的锆石为岩浆成因,未受明显的后期热液及变质事件的影响<sup>[38]</sup>。

锆石 U-Pb 定年结果显示:1 个锆石分析点所测得的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄( $(444 \pm 7) \text{Ma}$ )明显早于其他锆石,可能代表寄主岩石中捕获的早期变质或岩浆锆石碎屑(捕虏锆石);其余 39 个锆石分析点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄为 375~350 Ma,较为集中,并获得其加权平均年龄为  $(363.9 \pm 1.8) \text{Ma}$ (平均标准权重偏差(Mean Squared Weighted Deviation, MSWD)为 1.2),该年龄代表橄榄辉长岩样品的结晶年龄,可以视为尖山镁铁—超镁铁质岩体形成的主要岩浆事件的年龄(图 5)。

### 4.2 岩石地球化学特征

本次研究对尖山镁铁—超镁铁质岩体中的角闪辉长岩与橄榄辉长岩两种主要岩石类型进行主量元素地球化学分析(表 2)。结果表明:角闪辉长岩样品的 SiO<sub>2</sub> 含量为 49.4%~51.6%,平均值为 50.2%,属于典型的基性岩;MgO 含量为 5.49%~8.18%,平均值为 6.76%,具有中等镁质特征;Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> 含量较高,为 6.14%~10.63%,平均值为 8.47%,指示富 Fe 特征;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量相对较高,为 16.6%~18.3%,平均值为 17.5%;TiO<sub>2</sub> 含量变化较大,为 0.40%~1.67%,平均值为 1.09%;全碱(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)含量为 2.87%~4.12%,平均值为 3.57%,落入亚碱性系列范围;Mg<sup>#</sup> 值为 0.51~0.71,平均值为 0.61;镁铁摩尔比值(m/f)为 0.52~0.92,平均值为 0.68。

橄榄辉长岩的 SiO<sub>2</sub> 含量(46.4%~48.1%,平均值为 47.4%)较低,MgO 含量(14.07%~15.11%,平均值为 14.50%)较高,总体显示出富 Mg 与更强的原始岩浆特征。Mg<sup>#</sup> 值为 0.73~0.75,平均值为 0.74,整体高于角闪辉长岩。此外,橄榄辉长岩的 TiO<sub>2</sub> 含量与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量均低于角闪辉长岩,分别为 0.43%~0.51%(平均值为 0.47%)以及 12.9%~13.9%(平均值为 13.6%)。橄榄辉长岩的镁铁摩尔比值(m/f 值为 1.26~1.37,平均值为 1.32)较高。在 TAS 图解[图 6(a)]中,除样品 JS23-6 外,其余样品均落在玄武岩区;在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解[图 6(b)]中,样品均落在钙碱性系列与低钾



实线圆圈为 U-Pb 同位素分析点, 直径为  $30 \mu\text{m}$ ; 虚线圆圈为 Lu-Hf 同位素分析点, 直径为  $44 \mu\text{m}$ ; 标注年龄为  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄

图 4 橄榄辉长岩代表性锆石阴极发光图像

Fig. 4 CL Images of Representative Zircons from Olivine Gabbro

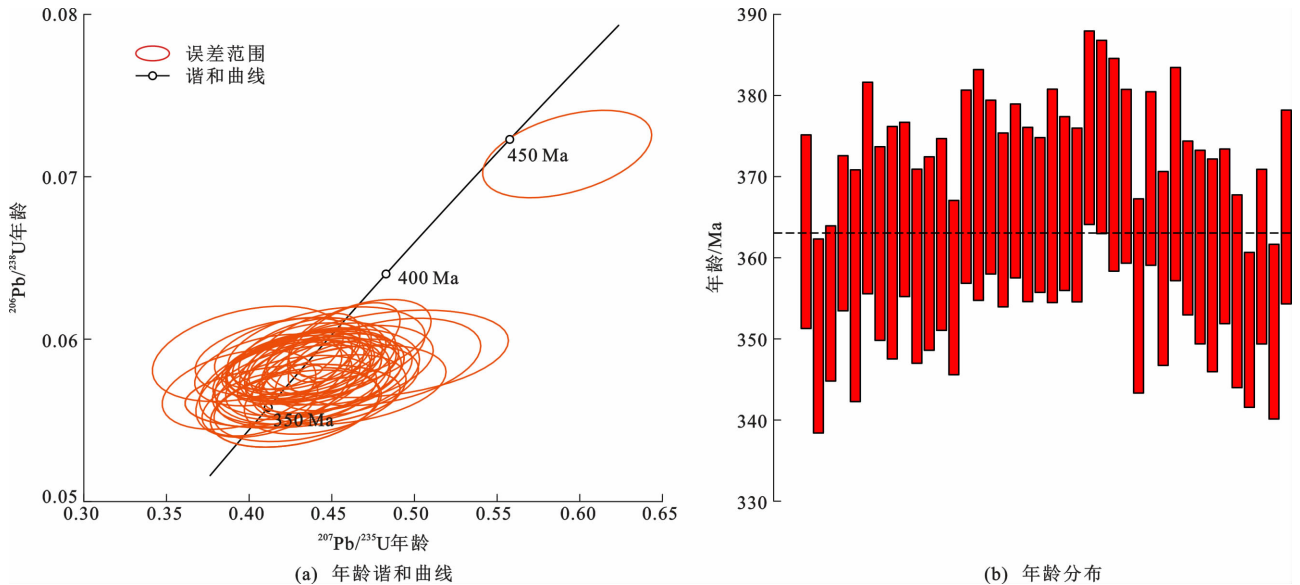


图 5 橄榄辉长岩年龄谐和曲线和年龄分布

Fig. 5 Concordia Diagram and Distribution of Ages for Olivine Gabbro

(拉斑)系列分界线附近,且样品更靠近低钾(拉斑)系列。

稀土与微量元素分析结果如表 2 所示。角闪辉长岩样品的稀土元素(Rare Earth Element, REE)总含量为  $(51.1 \sim 108.6) \times 10^{-6}$ , 平均值为  $73.3 \times 10^{-6}$ , 所有样品的  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为  $2.92 \sim 4.59$ , 平均值为  $4.01$ , 显示出明显的轻稀土元素(Light Rare Earth Element, LREE)相对富集、重稀土元素(Heavy Rare Earth Element, HREE)相对亏损的特征。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式[图 7(a)]中,角闪辉长岩样品呈现明显的右倾型分布;在原始地幔标准化微量元素蛛网图[图 7(b)]中,角闪辉长岩样品显示出明显的 Nb、Zr、Hf 等高场强元素(High Field Strength Element, HFSE)亏损,以及

Ba、Sr 富集的特征。

橄榄辉长岩样品的稀土元素总含量为  $(34.4 \sim 41.5) \times 10^{-6}$ , 平均值为  $38.5 \times 10^{-6}$ 。轻稀土元素总含量为  $(18.8 \sim 25.2) \times 10^{-6}$ , 平均值为  $21.7 \times 10^{-6}$ , 重稀土元素总含量为  $(15.5 \sim 18.1) \times 10^{-6}$ , 平均值为  $16.8 \times 10^{-6}$ 。轻、重稀土元素分异较弱, LREE/HREE 值为  $(1.21 \sim 1.55) \times 10^{-6}$ , 平均值为  $1.30 \times 10^{-6}$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为  $2.47 \sim 3.61$ , 平均值为  $2.80$ 。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式[图 7(a)]中,橄榄辉长岩样品整体亦呈轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾特征;在原始地幔标准化微量元素蛛网图[图 7(b)]中,橄榄辉长岩样品同样呈现 Nb、Zr 等高场强元素亏损以及 Ba、Sr 富集的特征。

表 1 橄榄辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 1 Analysis Results of LA-ICP-MS Zircon U-Pb Isotopes of Olivine Gabbro

分析点编号	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	Th/U 值	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 值	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 值	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma
JS23-B-26-1	144.49	343.87	0.42	0.055 7±0.002 3	0.445 8±0.019 6	0.057 9±0.001 0	439±93	374±14	363±6
JS23-B-26-2	122.90	288.36	0.43	0.055 5±0.002 6	0.427 7±0.020 9	0.055 8±0.001 0	432±102	362±15	350±6
JS23-B-26-3	155.22	185.37	0.84	0.054 3±0.003 3	0.426 3±0.026 6	0.056 5±0.000 8	383±137	361±19	354±5
JS23-B-26-4	173.11	498.68	0.35	0.055 7±0.001 9	0.443 1±0.015 1	0.057 9±0.000 8	439±78	372±11	363±5
JS23-B-26-6	184.08	202.79	0.91	0.054 1±0.003 0	0.415 0±0.019 3	0.056 9±0.001 2	376±119	352±14	357±7
JS23-B-26-7	812.45	652.06	1.25	0.053 1±0.001 5	0.432 2±0.014 3	0.058 9±0.001 1	345±32	365±10	369±7
JS23-B-26-8	153.63	181.52	0.85	0.055 1±0.003 0	0.435 1±0.023 3	0.057 7±0.001 0	417±116	367±17	362±6
JS23-B-26-9	69.37	120.50	0.58	0.056 2±0.003 3	0.441 2±0.025 3	0.057 7±0.001 2	457±133	371±18	361±7
JS23-B-26-10	151.56	256.72	0.59	0.054 4±0.002 7	0.438 1±0.021 4	0.058 4±0.000 9	391±109	369±15	366±6
JS23-B-26-11	135.78	182.59	0.74	0.058 2±0.003 0	0.460 4±0.024 0	0.057 2±0.001 0	539±118	385±17	359±6
JS23-B-26-12	243.34	333.72	0.73	0.054 3±0.002 2	0.429 6±0.017 9	0.057 5±0.001 0	383±93	363±13	360±6
JS23-B-26-13	428.52	2 476.82	0.17	0.054 3±0.001 3	0.434 5±0.011 4	0.057 8±0.001 0	383±54	366±8	362±6
JS23-B-26-14	162.31	265.15	0.61	0.054 8±0.002 6	0.428 7±0.019 8	0.056 8±0.000 9	467±106	362±14	356±5
JS23-B-26-15	129.34	158.77	0.81	0.052 8±0.003 2	0.425 1±0.023 6	0.058 9±0.001 0	320±131	360±17	369±6
JS23-B-26-16	90.30	125.32	0.72	0.049 3±0.003 0	0.399 2±0.023 6	0.059 1±0.001 2	161±143	341±17	370±8
JS23-B-26-17	162.56	382.21	0.43	0.055 1±0.002 0	0.449 0±0.016 2	0.058 8±0.000 9	417±77	377±11	368±5
JS23-B-26-18	96.48	267.69	0.36	0.053 7±0.002 4	0.430 8±0.018 4	0.058 2±0.000 9	367±102	364±13	364±5
JS23-B-26-20	224.98	425.71	0.53	0.053 0±0.002 1	0.431 8±0.017 1	0.058 8±0.000 9	328±91	364±12	368±6
JS23-B-26-21	149.22	201.99	0.74	0.054 2±0.002 8	0.436 1±0.021 6	0.058 3±0.000 9	389±121	368±15	365±6
JS23-B-26-22	431.22	388.68	1.11	0.052 9±0.002 0	0.430 4±0.017 9	0.058 3±0.000 8	324±89	363±13	365±5
JS23-B-26-23	175.57	368.86	0.48	0.059 7±0.002 0	0.592 4±0.020 9	0.071 4±0.001 1	591±74	472±13	444±7
JS23-B-26-24	136.21	184.20	0.74	0.059 1±0.002 9	0.481 9±0.023 8	0.058 6±0.001 1	569±106	399±16	367±6
JS23-B-26-25	528.40	460.09	1.15	0.054 1±0.002 0	0.440 2±0.016 5	0.058 5±0.000 9	376±81	370±12	367±5
JS23-B-26-26	793.12	630.54	1.26	0.053 2±0.001 8	0.431 9±0.015 4	0.058 3±0.000 9	339±78	365±11	365±5
JS23-B-26-30	689.70	835.44	0.83	0.055 5±0.001 8	0.457 3±0.013 9	0.059 8±0.001 0	432±74	382±10	375±6
JS23-B-26-31	99.57	139.04	0.72	0.054 7±0.003 2	0.446 7±0.024 4	0.059 3±0.001 1	398±131	375±17	372±7
JS23-B-26-32	389.84	319.63	1.22	0.052 9±0.002 0	0.433 8±0.016 4	0.059 1±0.000 9	328±85	366±12	370±6
JS23-B-26-33	316.61	282.08	1.12	0.056 9±0.002 5	0.446 0±0.020 0	0.056 6±0.001 0	487±101	374±14	355±6
JS23-B-26-34	332.25	394.14	0.84	0.051 5±0.002 2	0.423 1±0.018 0	0.059 1±0.000 9	265±100	358±13	370±6
JS23-B-26-35	123.61	207.52	0.60	0.054 5±0.002 8	0.431 6±0.022 0	0.057 2±0.001 0	394±133	364±16	358±6
JS23-B-26-36	87.24	146.30	0.60	0.058 7±0.003 6	0.483 7±0.029 9	0.059 1±0.001 1	554±133	401±20	370±7
JS23-B-26-37	352.59	342.92	1.03	0.051 4±0.002 3	0.411 6±0.018 2	0.058 1±0.000 9	257±108	350±13	364±6
JS23-B-26-38	319.59	351.38	0.91	0.055 0±0.002 3	0.438 9±0.018 8	0.057 6±0.001 0	413±94	370±13	361±6
JS23-B-26-39	180.11	183.87	0.98	0.052 5±0.002 4	0.418 6±0.019 9	0.057 3±0.001 1	309±106	355±14	359±7
JS23-B-26-40	170.41	300.83	0.57	0.057 0±0.002 0	0.457 2±0.016 9	0.057 8±0.000 9	500±78	382±12	362±6
JS23-B-26-41	189.12	191.36	0.99	0.050 3±0.002 6	0.393 9±0.019 0	0.056 9±0.001 0	209±119	337±14	356±6
JS23-B-26-42	415.70	433.75	0.96	0.052 6±0.002 0	0.406 5±0.014 3	0.056 0±0.000 8	309±81	346±10	351±5
JS23-B-26-43	221.95	263.14	0.84	0.057 4±0.002 5	0.454 5±0.019 6	0.057 4±0.000 9	506±96	380±14	360±5
JS23-B-26-44	168.73	200.28	0.84	0.055 5±0.002 6	0.429 4±0.020 7	0.055 9±0.000 9	432±138	363±15	350±5
JS23-B-26-45	159.69	234.92	0.68	0.056 9±0.002 6	0.459 5±0.021 2	0.058 4±0.001 0	487±102	384±15	366±5

注: $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量。

## 4.3 锆石 Hf 同位素特征

本文在已获得锆石 U-Pb 年龄的基础上,对 15 颗锆石进行原位 Lu-Hf 同位素分析,结果见表 3。

其中,14 个分析点  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.282 818~0.282 954,平均值为 0.282 898,大于球粒陨石均一储库 (Chondritic Uniform Reservoir, CHUR) 的

表2 角闪辉长岩和橄榄辉长岩全岩主量和微量元素分析结果

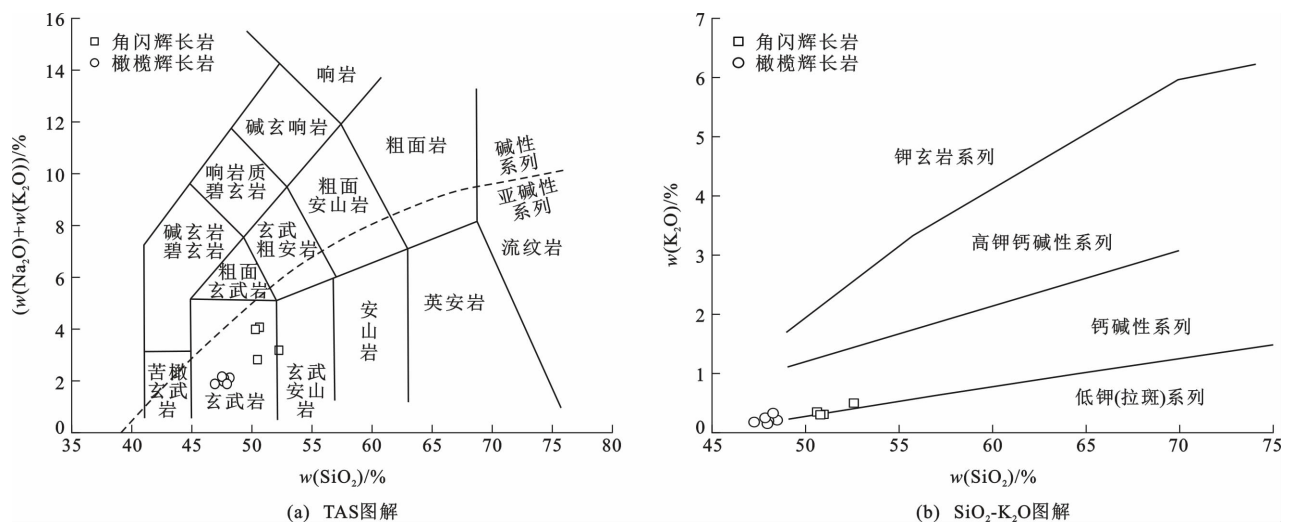
Table 2 Analysis Results of Whole-rock Major and Trace Elements of Hornblende Gabbro and Olivine Gabbro

样品编号	JS23-3	JS23-4	JS23-6	JS23-7	JS23-B-8	JS23-B-10	JS23-B-11	JS23-B-12	JS23-B-13	JS23-B-14	
岩性	角闪辉长岩				橄榄辉长岩						
w(SiO <sub>2</sub> )/%	50.2	49.8	51.6	49.4	48.1	47.8	48.1	46.4	46.9	46.9	
w(TiO <sub>2</sub> )/%	1.58	1.67	0.40	0.70	0.51	0.50	0.47	0.44	0.44	0.43	
w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	16.90	16.60	18.20	18.30	13.90	13.80	13.90	12.90	13.40	13.60	
w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup> )/%	10.52	10.63	6.60	6.14	9.85	10.04	10.54	9.89	9.86	10.32	
w(MnO)/%	0.14	0.14	0.12	0.12	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	
w(MgO)/%	5.49	5.87	8.18	7.49	14.07	14.16	14.45	14.80	14.41	15.11	
w(CaO)/%	9.17	9.59	9.74	12.29	10.42	10.85	10.58	10.28	10.07	10.75	
w(Na <sub>2</sub> O)/%	3.75	3.63	2.68	2.50	1.94	1.94	1.89	1.91	1.56	1.74	
w(K <sub>2</sub> O)/%	0.31	0.34	0.49	0.29	0.21	0.20	0.15	0.24	0.32	0.18	
w(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )/%	0.39	0.07	0.06	0.04	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	
烧失量/%	0.92	1.06	1.40	2.07	0.16	0.21	0.43	2.22	2.41	0.32	
w <sub>total</sub> /%	99.4	99.4	99.5	99.3	99.3	99.7	100.7	99.1	99.5	99.5	
全碱含量/%	4.12	4.04	3.23	2.87	2.17	2.15	2.03	2.22	1.94	1.94	
Mg <sup>#</sup> 值	0.51	0.52	0.71	0.71	0.74	0.74	0.73	0.75	0.74	0.74	
m/f值	0.52	0.54	0.92	0.74	1.29	1.26	1.28	1.37	1.35	1.34	
w(Li)/10 <sup>-6</sup>	9.13	8.57	10.32	6.85	2.73	3.15	3.53	10.70	8.34	2.77	
w(Be)/10 <sup>-6</sup>	0.78	0.79	0.71	0.86	0.32	0.31	0.25	0.27	0.27	0.27	
w(Sc)/10 <sup>-6</sup>	15.10	21.00	8.31	15.40	21.00	23.10	17.30	20.60	26.10	24.60	
w(V)/10 <sup>-6</sup>	277	290	73	127	159	156	161	140	146	149	
w(Cr)/10 <sup>-6</sup>	85	103	260	204	1 420	1 374	1 424	1 430	1 382	1 461	
w(Co)/10 <sup>-6</sup>	44.8	44.4	46.2	66.0	68.5	75.1	95.2	76.1	73.4	82.6	
w(Ni)/10 <sup>-6</sup>	58	81	131	57	382	391	397	410	372	415	
w(Cu)/10 <sup>-6</sup>	50.0	48.8	27.1	14.9	22.1	24.5	28.5	99.5	13.6	27.8	
w(Zn)/10 <sup>-6</sup>	88.2	89.9	54.8	46.6	67.0	66.5	69.8	68.4	68.5	67.1	
w(Ga)/10 <sup>-6</sup>	19.3	20.2	16.9	17.9	13.3	12.4	11.7	11.5	11.3	12.2	
w(Rb)/10 <sup>-6</sup>	6.78	6.93	16.66	7.86	3.79	3.08	2.73	5.60	11.86	4.53	
w(Sr)/10 <sup>-6</sup>	484	507	464	569	290	292	283	283	2 401	289	
w(Y)/10 <sup>-6</sup>	24.1	18.8	10.9	13.9	11.1	11.2	9.8	9.9	9.6	10.2	
w(Zr)/10 <sup>-6</sup>	47.6	57.4	23.1	40.6	31.7	30.5	22.9	22.4	20.9	23.3	
w(Nb)/10 <sup>-6</sup>	4.03	4.17	1.52	3.27	1.37	1.61	1.50	1.33	1.04	1.37	
w(Mo)/10 <sup>-6</sup>	0.32	0.32	0.11	0.18	0.17	0.17	0.20	0.42	0.17	0.20	
w(Cd)/10 <sup>-6</sup>	0.19	0.13	0.12	0.13	0.10	0.10	0.09	0.14	0.08	0.10	
w(In)/10 <sup>-6</sup>	0.06	0.06	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.04	0.04	
w(Cs)/10 <sup>-6</sup>	0.58	0.57	1.43	0.80	0.23	0.18	0.27	0.47	0.68	0.28	
w(Ba)/10 <sup>-6</sup>	181.0	255.0	166.0	129.0	72.7	71.5	61.6	81.4	88.1	67.5	
w(La)/10 <sup>-6</sup>	12.50	7.37	7.16	7.86	3.66	3.73	3.23	4.49	3.21	3.99	
w(Ce)/10 <sup>-6</sup>	29.20	16.30	14.70	17.60	9.40	9.51	8.21	11.10	8.01	9.84	
w(Pr)/10 <sup>-6</sup>	3.92	2.11	1.69	2.22	1.21	1.23	1.07	1.38	1.03	1.24	
w(Nd)/10 <sup>-6</sup>	17.80	9.61	7.00	9.56	5.58	5.58	4.91	6.10	4.70	5.63	
w(Sm)/10 <sup>-6</sup>	4.29	2.57	1.66	2.33	1.51	1.54	1.36	1.51	1.31	1.47	
w(Eu)/10 <sup>-6</sup>	1.52	1.39	0.81	0.91	0.63	0.64	0.59	0.64	0.58	0.63	
w(Gd)/10 <sup>-6</sup>	4.70	2.98	1.90	2.55	1.80	1.80	1.61	1.73	1.55	1.72	
w(Tb)/10 <sup>-6</sup>	0.72	0.51	0.31	0.42	0.31	0.31	0.28	0.28	0.27	0.29	
w(Dy)/10 <sup>-6</sup>	4.32	3.36	2.00	2.68	1.96	1.99	1.80	1.82	1.72	1.87	

续表 2

样品编号	JS23-3	JS23-4	JS23-6	JS23-7	JS23-B-8	JS23-B-10	JS23-B-11	JS23-B-12	JS23-B-13	JS23-B-14
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	0.81	0.65	0.39	0.52	0.38	0.39	0.35	0.35	0.34	0.37
$w(\text{Er})/10^{-6}$	2.17	1.80	1.08	1.42	1.05	1.06	0.96	0.95	0.92	0.99
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.31	0.27	0.17	0.21	0.16	0.16	0.14	0.14	0.14	0.15
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	1.95	1.81	1.13	1.42	1.03	1.05	0.94	0.89	0.89	0.95
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.28	0.27	0.17	0.21	0.15	0.16	0.14	0.14	0.13	0.14
$w(\text{Hf})/10^{-6}$	1.23	1.46	0.74	1.07	0.91	0.89	0.71	0.70	0.64	0.72
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	0.60	0.59	0.52	1.23	0.52	0.73	1.16	0.69	0.62	0.84
$w(\text{Pb})/10^{-6}$	4.82	5.40	4.61	4.10	2.44	1.98	1.61	3.01	1.64	2.16
$w(\text{Bi})/10^{-6}$	0.07	0.02	0.04	0.15	0.03	0.03	0.03	0.18	0.09	0.04
$w(\text{Th})/10^{-6}$	0.86	0.65	2.16	0.50	0.52	0.45	0.35	0.58	0.39	0.49
$w(\text{U})/10^{-6}$	0.41	0.39	0.50	0.23	0.16	0.13	0.11	0.22	0.13	0.15
$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	108.6	69.7	51.1	63.8	39.9	40.3	35.4	41.5	34.4	39.5
$\delta\text{Eu}$ 值	1.03	1.54	1.39	1.14	1.16	1.17	1.22	1.20	1.25	1.21
$\delta\text{Ce}$ 值	0.51	0.50	0.50	0.51	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值	4.59	2.92	4.55	3.98	2.55	2.56	2.47	3.61	2.58	3.01
$(\text{La}/\text{Nb})_{\text{PM}}$ 值	3.15	1.79	4.78	2.44	2.71	2.35	2.19	3.43	3.13	2.96
$(\text{Th}/\text{Ta})_{\text{PM}}$ 值	0.98	0.76	2.87	0.28	0.69	0.43	0.21	0.57	0.43	0.40

注： $w_{\text{total}}$ 为主量元素总含量； $w_{\text{REE}}$ 为稀土元素总含量； $\delta\text{Eu}$ 值为Eu异常； $\delta\text{Ce}$ 值为Ce异常。



图件引自文献[39]和[40]

图 6 角闪辉长岩与橄榄辉长岩 TAS 图解和  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  图解

Fig. 6 Diagrams of TAS and  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  of Hornblende Gabbro and Olivine Gabbro

$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.282 843),表明本次研究获得的锆石来源于相对亏损的地幔源区。

通过 U-Pb 定年的原位校正计算,尖山镁铁—超镁铁质岩体  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 1.65~6.46,平均值为 4.45,具有明显的亏损地幔源区特征,反映岩浆源区来自经历长期亏损演化的幔源熔体。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)\text{-}t$  图解(图 8)显示,分析点全部落入球粒陨石和亏损地幔之间,进一步支持橄榄辉长岩母岩浆来源于年轻、亏损的地幔源区。区域上镁铁—超镁铁质成矿岩体(如骆驼山、西南山、双峰山、柳园) $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 1.65~

14.70(图 8),与尖山镁铁—超镁铁质岩体 Hf 同位素特征类似,因此其可能具有与这些成矿岩体相似的岩浆源区。

## 5 讨论

### 5.1 岩体形成时代

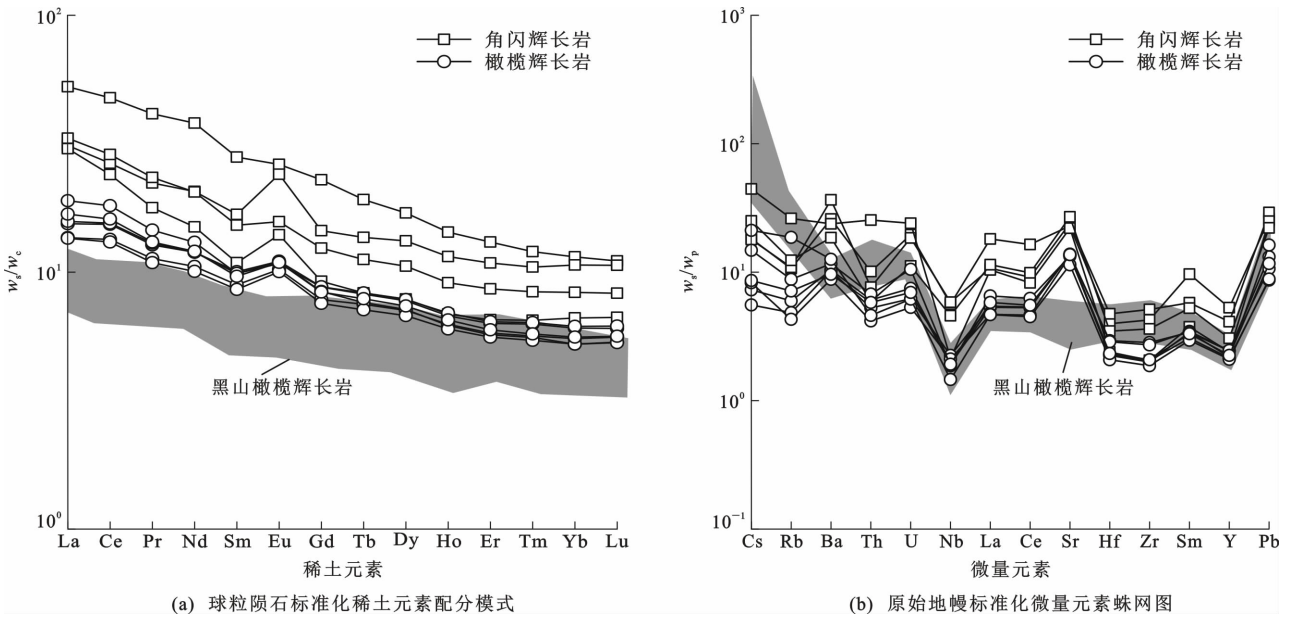
本文通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年对内蒙古北山地区尖山橄榄辉长岩样品 JS23-B-26 进行年代学分析,获得加权平均年龄为  $(363.9 \pm 1.8)\text{Ma}$ ,其代表该镁铁—超镁铁质岩体的成岩时代。该年龄

表3 橄榄辉长岩中锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Analysis Results of Zircon Hf Isotope of Olivine Gabbro

分析点编号	$t/\text{Ma}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值
JS23-B-26-1	363	0.050 855	0.001 505	$0.282\ 882 \pm 0.000\ 057$	3.90
JS23-B-26-2	362	0.032 630	0.001 004	$0.282\ 849 \pm 0.000\ 060$	2.74
JS23-B-26-3	356	0.037 453	0.001 113	$0.282\ 765 \pm 0.000\ 056$	-0.23
JS23-B-26-4	361	0.027 307	0.000 811	$0.282\ 886 \pm 0.000\ 055$	4.05
JS23-B-26-5	358	0.020 731	0.000 638	$0.282\ 930 \pm 0.000\ 060$	5.62
JS23-B-26-6	360	0.030 156	0.000 884	$0.282\ 818 \pm 0.000\ 065$	1.65
JS23-B-26-7	368	0.047 840	0.001 755	$0.282\ 920 \pm 0.000\ 050$	5.26
JS23-B-26-8	364	0.036 334	0.001 245	$0.282\ 895 \pm 0.000\ 051$	4.37
JS23-B-26-9	367	0.012 523	0.000 391	$0.282\ 831 \pm 0.000\ 047$	2.11
JS23-B-26-10	368	0.037 289	0.001 438	$0.282\ 934 \pm 0.000\ 053$	5.74
JS23-B-26-11	363	0.050 310	0.001 547	$0.282\ 954 \pm 0.000\ 050$	6.44
JS23-B-26-12	361	0.054 329	0.001 556	$0.282\ 954 \pm 0.000\ 047$	6.46
JS23-B-26-13	359	0.029 612	0.000 883	$0.282\ 895 \pm 0.000\ 049$	4.38
JS23-B-26-14	362	0.032 604	0.000 966	$0.282\ 900 \pm 0.000\ 044$	4.60
JS23-B-26-15	359	0.034 504	0.001 299	$0.282\ 913 \pm 0.000\ 079$	5.00

注： $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为年龄  $t$  对应的  $\epsilon_{\text{Hf}}$  值。



$w_s$  为样品含量； $w_c$  为球粒陨石含量； $w_p$  为原始地幔含量；同一图中相同线条对应不同样品；球粒陨石标准化值和原始地幔标准化值引自文献[41]；黑山橄榄辉长岩主量、微量元素含量引自文献[27]

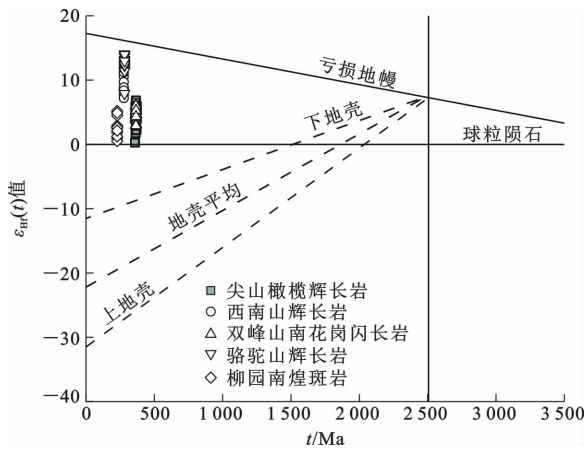
图7 角闪辉长岩与橄榄辉长岩的球粒陨石标准化稀土元素配分模式和原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE Pattern and Primitive Mantle-normalized Trace Element Spider Diagram of Hornblende Gabbro and Olivine Gabbro

属于晚泥盆世,明显与黑山地区铜镍成矿相关的镁铁—超镁铁质岩体年龄(376~355 Ma)<sup>[13-14]</sup>一致,说明两者形成于相近的成矿时代,或受控于统一的区域构造背景。

尖山镁铁—超镁铁质岩体的形成时代早于新疆西天山—东准噶尔地区广泛发育的晚石炭世(310~280 Ma)弧后伸展或碰撞后岩浆活动<sup>[42]</sup>,反映尖山

地区岩浆活动处于新一轮俯冲—增生构造体系内。结合地球化学与同位素证据,尖山镁铁—超镁铁质岩体的形成可归因于晚泥盆世俯冲板片释放流体交代的亏损地幔,触发部分熔融形成富镁玄武质岩浆,进而引发成岩成矿过程。因此,尖山镁铁—超镁铁质岩体锆石 U-Pb 年龄不仅为厘定该岩体的成岩时代提供了关键定量约束,也为揭示中亚造山带东段



底图数据引自文献[43];西南山辉长岩、骆驼山辉长岩、柳园南煌斑岩、双峰山花岗岩闪长岩数据分别引自文献[17]、[29]和[44]

图 8 北山地区镁铁—超镁铁质岩体  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $t$  图解

Fig. 8 Diagram of  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $t$  of Mafic-ultramafic Intrusion in the Beishan Area

晚古生代岩浆事件的时空演化规律提供了重要的年代学证据。同时,该时间窗口与区域成矿作用密切耦合,进一步增强了尖山地区作为潜在铜镍成矿靶区的地质指示意义。

## 5.2 岩石成因与岩浆源区特征

尖山镁铁—超镁铁质岩体具有较高的金属矿物含量,同时表现出一定程度的蚀变特征。因此,在探讨其岩石成因与岩浆源区性质之前,有必要先评估金属矿物富集与蚀变作用对地球化学指标尤其是亲铁元素与大离子亲石元素(Large Ion Lithophile Element, LILE)组成的影响。

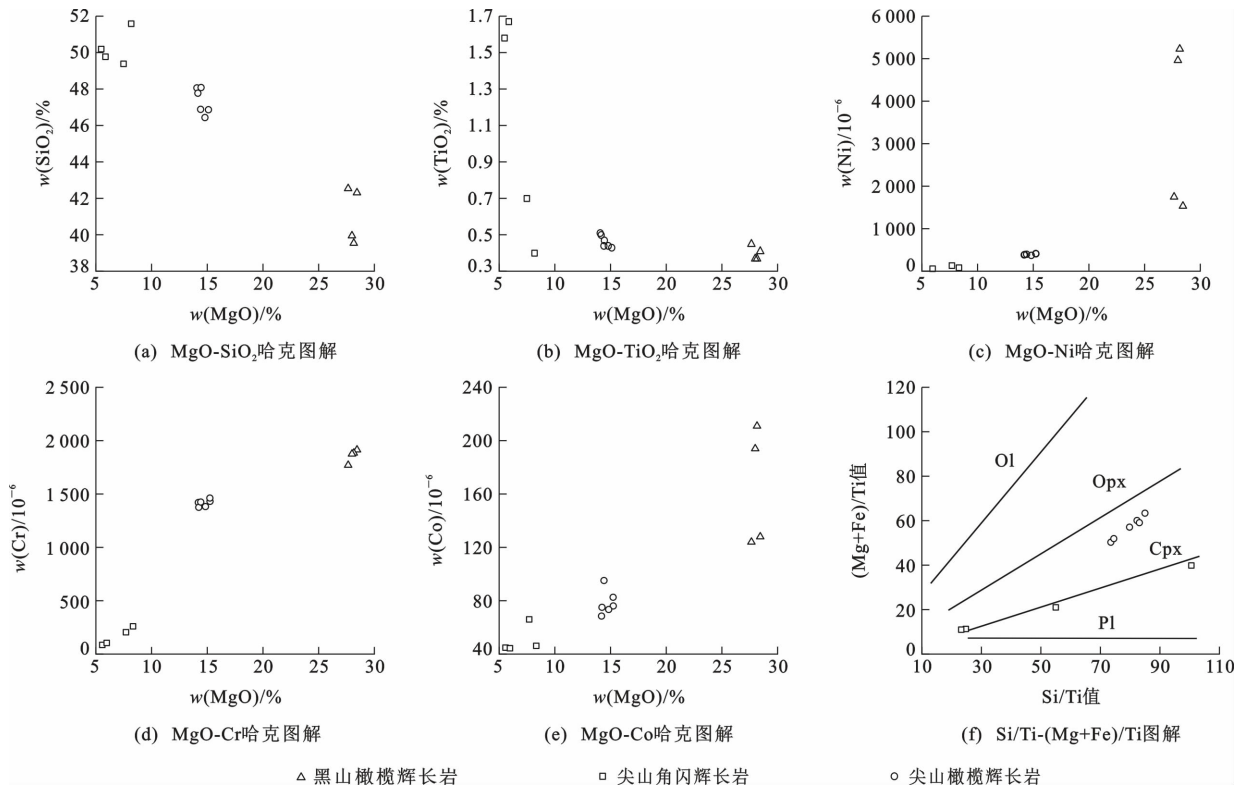
岩相学特征显示,角闪辉长岩与橄榄辉长岩中的主要金属矿物为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、钛铁矿等,分布较为集中,表明其对整体岩石地球化学组分的影响有限。此外, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$ 图解与 $\text{TiO}_2$ -V图解表明三者之间相关性较弱(判定系数均低于0.5,图略),暗示金属矿物对亲铁元素的影响较小。同样,烧失量(Loss on Ignition, LOI)与Rb、Ba、Sr等元素含量的相关性亦不显著(判定系数均低于0.5,图略),说明蚀变作用对大离子亲石元素的影响同样有限。综上所述,本次研究的角闪辉长岩与橄榄辉长岩样品的地球化学数据基本保留了原始信息,可用于进一步探讨岩石成因、岩浆源区特征及其成岩构造背景。

主量元素特征显示,尖山镁铁—超镁铁质岩体具有典型的分异演化特征。在哈克图解中, $\text{MgO}$ 与 $\text{SiO}_2$ 含量成明显负相关关系[图9(a)],而与Ni、Co含量成正相关关系[图9(c)、(e)],反映其岩浆经历

了以橄榄石和辉石为主的分离结晶作用。 $\text{Si}/\text{Ti}$ - $(\text{Mg}+\text{Fe})/\text{Ti}$ 图解[图9(f)]显示,岩浆分异过程中角闪辉长岩主要受控于单斜辉石分离结晶,而橄榄辉长岩受单斜辉石和斜方辉石的共同分离结晶影响,并以斜方辉石为主。同时,角闪辉长岩较高的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量指示可能存在斜长石的堆晶作用或结晶分离效应。相比而言,橄榄辉长岩的 $\text{Mg}^\#$ 值较高且更加集中(0.73~0.75,平均值为0.74), $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量显著偏低,说明该类岩石代表了更原始的岩浆产物,可能形成于更高温的地幔部分熔融阶段[45-46]。

锆石 Hf 同位素是判断岩浆源区性质及其地幔演化历史的重要手段。一般认为,亏损地幔和新生地壳来源的岩浆具有较高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值(通常不低于0.282 772),其对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值;而来源于古老地壳或富集岩石圈地幔的岩浆则表现为较低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值和负 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值[47-49]。本次研究结果表明,橄榄辉长岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.282 818~0.282 954(平均值为0.282 898),对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为1.65~6.46(平均值为4.45),表明其岩浆源区来自亏损地幔。尽管岩浆起源于亏损地幔,但是其在上升过程中仍不可避免地受到地壳物质混染的影响。这种混染作用通常会导致 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 以及大离子亲石元素(如Th、Rb、Ba、Cs等)含量升高,同时表现出La/Nb、Zr/Nb值升高,以及Th/Yb、Ce/Pb值降低等特征。尖山镁铁—超镁铁质岩体的Ce/Pb值为3.01~6.07,显著低于典型的地幔源岩浆(如洋中脊玄武岩(Mid-ocean Ridge Basalt, MORB))的Ce/Pb值(约23),但位于大陆地壳Ce/Pb值的范围( $<15$ )内,指示其岩浆在上升过程中受到地壳混染。此外,样品Nb/U值(3.04~14.2,平均值为9.55)亦偏低,进一步印证地壳物质混染过程的存在。在 $(\text{La}/\text{Nb})_{\text{PM}}-(\text{Th}/\text{Ta})_{\text{PM}}$ 图解[图10(a)]中,多数样品点位于地幔和下地壳组成端元之间,表明尖山镁铁—超镁铁质岩体岩浆源区为亏损地幔物质,并且在上升侵位过程中经历了一定程度的下地壳物质的混染。通过将正常型洋中脊玄武岩(N-MORB)作为地幔端元、大陆地壳作为混染端元的模拟混合计算,进一步证明尖山地区岩浆上升过程中具有地壳混染的特征[图10(b)]。

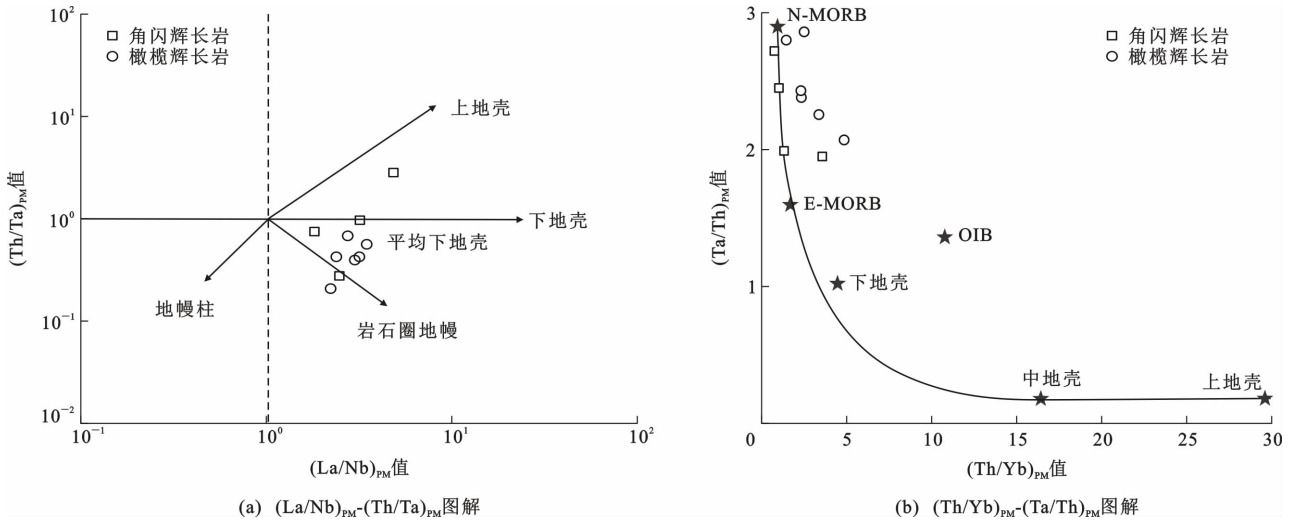
稀土及微量元素特征表明,角闪辉长岩与橄榄辉长岩均具有明显轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型配分模式[图6(a)],且两类岩石均表现为Nb、Zr等高场强元素亏损以及Ba、Sr等大离子



图(f)底图引自文献[50];黑山橄榄辉长岩数据引自文献[27]

图9 角闪辉长岩和橄榄辉长岩分离结晶作用判别图解

Fig. 9 Discriminant Diagrams Illustrating Fractional Crystallization Trends of Hornblende Gabbro and Olivine Gabbro



E-MORB为富集型洋中脊玄武岩;OIB为洋岛玄武岩;底图数据引自文献[51]和[52]

图10 角闪辉长岩和橄榄辉长岩  $(La/Nb)_{PM}$ - $(Th/Ta)_{PM}$ 图解及  $(Th/Yb)_{PM}$ - $(Ta/Th)_{PM}$ 图解

Fig. 10 Diagrams of  $(La/Nb)_{PM}$ - $(Th/Ta)_{PM}$  and  $(Th/Yb)_{PM}$ - $(Ta/Th)_{PM}$  of Hornblende Gabbro and Olivine Gabbro

亲石元素富集[图7(b)],尖山镁铁-超镁铁质岩体样品中普遍存在的Nb负异常及Zr-Hf中等负异常,也与岛弧玄武岩(Island Arc Basalt, IAB)特征一致,进一步印证了俯冲流体对源区地幔的强烈交代作用。在Nb/Yb-Th/Yb图解和La/Nb-La/Ba图解[图11(a)、(b)]中,样品普遍表现出高Ba/La

值、高La/Nb值的特征,进一步支持其源区可能受到俯冲板片组分影响;在Nb/Y-Rb/Y图解和Ba/La-Th/Yb图解[图11(c)、(d)]中,样品普遍表现出低Nb/Y值、高Rb/Y值的特征,进一步指示其源区受到俯冲板片流体作用的影响。

综合年代学、地球化学及同位素研究结果,尖山

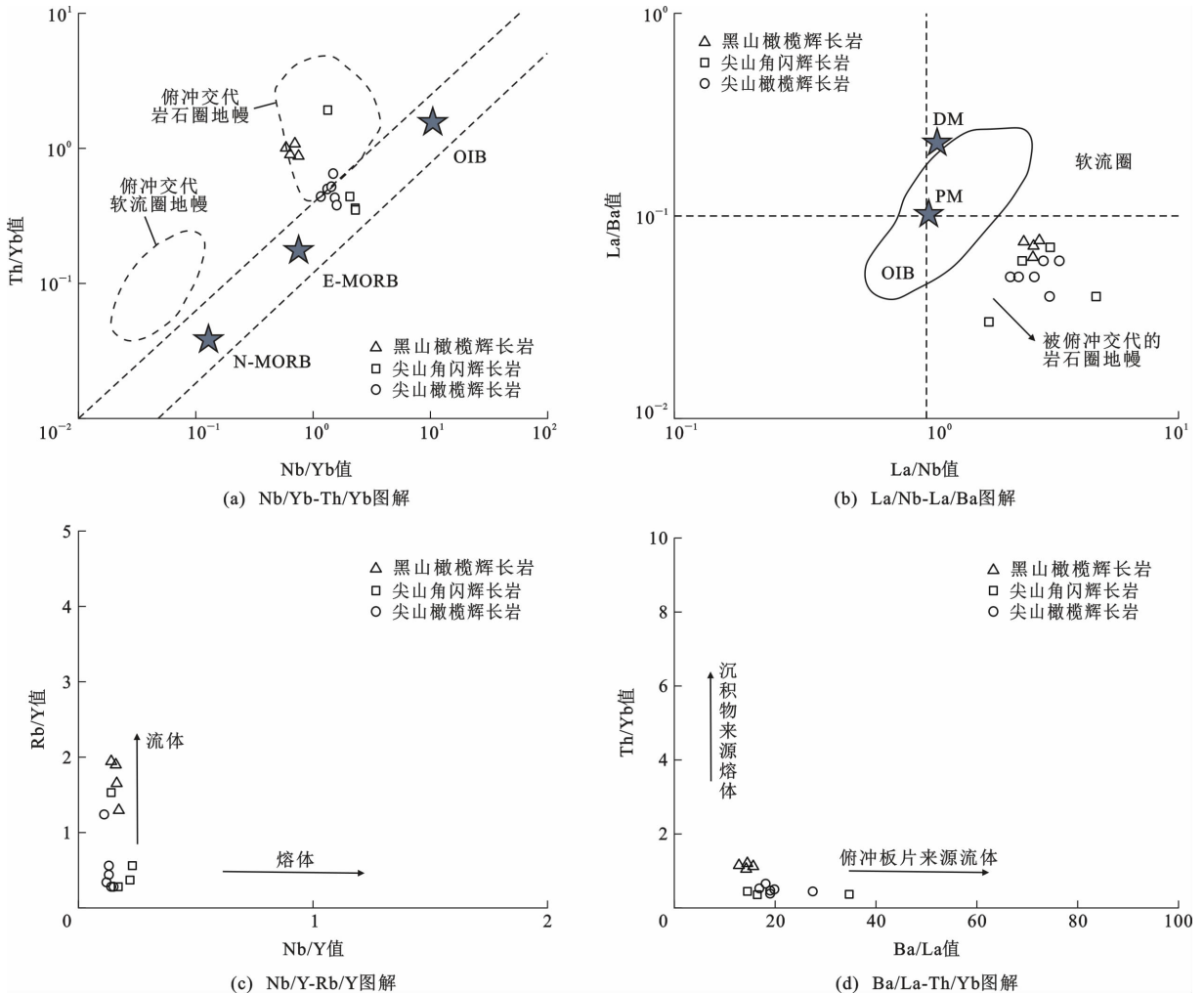
地区角闪辉长岩与橄榄辉长岩很可能来源于同一套富 Mg 的亏损地幔岩浆系统,两类岩石分别代表该系统结晶分异过程中的不同阶段产物。尖山镁铁—超镁铁质岩体源区为受俯冲流体交代的亏损地幔,其岩浆在上升过程中经历了不同程度的结晶分异、堆晶与地壳混染作用,最终形成角闪辉长岩与橄榄辉长岩两类岩体。与区域上黑山铜镍成矿相关的镁铁—超镁铁质岩体相比,尖山镁铁—超镁铁质岩体的稀土元素总含量较高,而且 Eu、Sr 表现出更明显的正异常,指示其岩浆系统中斜长石堆晶的参与程度更高,暗示成矿系统中岩浆演化阶段存在差异。

### 5.3 成岩构造背景

近年来,有研究表明北山地区在晚泥盆世仍然存在活动大陆边缘岩浆作用。吕鑫等获得的北山地区钙碱性花岗闪长岩-二长花岗岩组合的年龄为

368.0~366.3 Ma,表明该期岩浆活动发生于板块俯冲背景<sup>[53]</sup>。区域内还出露了上泥盆统的安山岩-流纹岩组合以及形成于俯冲过程中的镁铁—超镁铁质岩,进一步支持该时期仍处于俯冲-消减构造环境中。此外,地层学与古生物学证据亦支持该区在泥盆纪末期经历了构造体制的转变。例如,公婆泉一墩墩山地区的上部泥盆系磨拉石建造与下部奥陶系放射虫化石的共存,表明该区由浅海沉积环境过渡至造山带构造环境<sup>[11,32]</sup>;而下泥盆统与上石炭统之间普遍发育的角度不整合,进一步反映了早石炭世前后区域构造体制的剧烈调整,可能对应古亚洲洋最终闭合及大陆地壳增厚事件。

本次研究的尖山镁铁—超镁铁质岩体在地球化学上表现出典型的俯冲带指示特征:富集 Ba、Sr 等大离子亲石元素,明显亏损 Nb、Zr 等高场强元素;



DM 为亏损地幔;PM 为原始地幔;黑山橄榄辉长岩数据引自文献[27];底图引自文献[49]、[54]和[55]

图 11 角闪辉长岩和橄榄辉长岩 Nb/Yb-Th/Yb 图解、La/Nb-La/Ba 图解、Nb/Y-Rb/Y 图解和 Ba/La-Th/Yb 图解

Fig. 11 Diagrams of Nb/Yb-Th/Yb, La/Nb-La/Ba, Nb/Y-Rb/Y, and Ba/La-Th/Yb of Hornblende Gabbro and Olivine Gabbro

在原始地幔标准化微量元素蛛网图中具有显著的 Nb-Ta 负异常;在球粒陨石标准化稀土元素配分模式中则表现为轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损的特征。此外,所有样品 La/Nb 值与 Th/Nb 值较高,亦支持其形成于板块俯冲相关环境。本次研究获得的尖山橄榄辉长岩锆石 Hf 同位素数据表明,其母岩浆来自于亏损地幔。区域研究同样显示,中一晚泥盆世北山地区广泛发育镁铁质岩体与 A 型花岗岩组合,其中晚泥盆世花岗岩 Nd 同位素 ( $\epsilon_{Nd}(t) = -3.8 \sim -0.3$ ) 同样显示幔源物质的显著参与<sup>[44]</sup>。在区域尺度上,新疆坡北与甘肃北山地区二叠纪镁铁—超镁铁质岩体的研究也揭示出明显受俯冲板片物质交代的地幔源区特征<sup>[17,56]</sup>。这表明中亚造山带西段广泛存在俯冲板片流体/熔体交代地幔的作用,形成具有岛弧玄武岩特征的镁铁—超镁铁质岩浆组合,构成区域铜镍成矿的重要岩浆基础。

因此,综合区域地质演化与岩石地球化学证据,尖山地区镁铁—超镁铁质岩体形成机制可归因于晚泥盆世俯冲板片的再活化与底侵过程。俯冲过程中释放的流体或熔体对上覆亏损地幔楔造成交代,诱发部分熔融并产生富 Mg、富 H<sub>2</sub>O 的玄武质岩浆。该岩浆在上升过程中经历结晶分异与地壳混染,最终形成橄榄辉长岩、角闪辉长岩及深部的橄榄辉石岩等多样性产物。

此外,尖山地区岩体具有明显的岩浆分异特征,钻孔揭示的橄榄辉石岩相显示出较完整的岩浆分离结晶过程,具备岩浆型硫化物矿床形成的物质与过程基础<sup>[57-58]</sup>。地表样品中零星分布星点状硫化物(如镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等),这些硫化物的存在表明岩浆系统已达到硫饱和,硫化物熔体已发生熔离作用,尖山镁铁—超镁铁质岩体深部或基底中可能存在一定的铜镍找矿潜力。

## 6 结 语

(1)内蒙古北山地区尖山橄榄辉长岩中锆石 U-Pb 年龄为  $(363.9 \pm 1.8)$  Ma,区域地质对比及岩石地球化学数据分析显示其形成于与俯冲相关的伸展构造环境。

(2)尖山镁铁—超镁铁质岩体具有正的  $\epsilon_{Hf}(t)$  值(1.65~6.46),指示其源区为亏损地幔;在原始地幔标准化微量元素蛛网图中,岩体具有明显的 Nb 负异常及 Zr-Hf 中等负异常,且具有较高的 Ba/La 值和较低的 Th/Yb 值,指示岩体源于受俯冲板片流

体交代地幔部分熔融的产物,同时在岩浆侵位过程中经历了一定程度的地壳物质混染。

(3)尖山镁铁—超镁铁质岩体与同构造带中的甘肃黑山大型铜镍矿赋矿岩石在年代学、地质背景、岩石地球化学特征相似,其深部或基底可能存在一定的铜镍找矿潜力。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] 龚全胜,刘明强,梁明宏,等.北山造山带大地构造相及构造演化[J].西北地质,2003,36(1):11-17.  
GONG Quan-sheng, LIU Ming-qiang, LIANG Ming-hong, et al. The Tectonic Facies and Tectonic Evolution of Beishan Orogenic Belt, Gansu[J]. Northwestern Geology, 2003, 36(1): 11-17.
- [2] 何世平,周会武,任秉琛,等.甘肃—内蒙古北山地区古生代地壳演化[J].西北地质,2005,38(3):6-15.  
HE Shi-ping, ZHOU Hui-wu, REN Bing-chen, et al. Crustal Evolution of Palaeozoic in Beishan Area, Gansu and Inner Mongolia, China[J]. Northwestern Geology, 2005, 38(3): 6-15.
- [3] 何世平,任秉琛,姚文光,等.甘肃—内蒙古北山地区构造单元划分[J].西北地质,2002,35(4):30-40.  
HE Shi-ping, REN Bing-chen, YAO Wen-guang, et al. The Division of Tectonic Units of Beishan Area, Gansu-Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 2002, 35(4): 30-40.
- [4] 龚全胜,刘明强,李海林,等.甘肃北山造山带类型及基本特征[J].西北地质,2002,35(3):28-34.  
GONG Quan-sheng, LIU Ming-qiang, LI Hai-lin, et al. The Type and Basic Characteristics of Beishan Orogenic Belt, Gansu [J]. Northwestern Geology, 2002, 35(3): 28-34.
- [5] 余吉远,王国强,计波,等.北山造山带马鬃山泥盆纪花岗岩对古亚洲洋构造演化的制约[J].地球科学与环境学报,2025,47(1):1-15.  
YU Ji-yuan, WANG Guo-qiang, JI Bo, et al. Constraints of Mazongshan Devonian Granites on the Tectonic Evolution of the Paleo-Asian Ocean in Beishan Orogenic Belt, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2025, 47(1): 1-15.
- [6] 彭巨贵,张发荣,赵福昌.甘新蒙北山地区成矿带划分和基本特征对比[J].地球科学与环境学报,2006,28(3):11-18.  
PENG Ju-gui, ZHANG Fa-rong, ZHAO Fu-chang. Divisions and Contrast of Basic Features of Metallogenic Belts in Beishan Area of Gansu-Xinjiang-Inner Mongolia[J]. Journal of Earth Sciences and Environ-

- ment, 2006, 28(3): 11-18.
- [7] 左国朝, 刘义科, 刘春燕. 甘新蒙北山地区构造格局及演化[J]. 甘肃地质学报, 2003, 12(1): 1-15.  
ZUO Guo-chao, LIU Yi-ke, LIU Chun-yan. Framework and Evolution of the Tectonic Structure in Beishan Area Across Gansu Province, Xinjiang Autonomous Region and Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Acta Geologica Gansu, 2003, 12(1): 1-15.
- [8] 刘雪亚, 王 荃. 中国西部北山造山带的大地构造及其演化[C]//中国地质科学院地质研究所. 中国地质科学院地质研究所文集(28). 北京:地质出版社, 1995: 37-48.  
LIU Xue-ya, WANG Quan. Tectonics and Evolution of the North Mountain Orogenic Belt in Western China[C]//Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. No. 28 Collected Papers of Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (28). Beijing: Geological Publishing House, 1995: 37-48.
- [9] XIAO W J, MAO Q G, WINDLEY B F, et al. Paleozoic Multiple Accretionary and Collisional Processes of the Beishan Orogenic Collage[J]. American Journal of Science, 2010, 310(10): 1553-1594.
- [10] 田 健, 段霄龙, 程先钰. 北山造山带中部晚志留世—早泥盆世侵入岩源区特征及其反映的陆壳增生机制[J]. 地质调查与研究, 2020, 43(3): 207-211.  
TIAN Jian, DUAN Xiao-long, CHENG Xian-yu. Source Characteristics of the Late Silurian-Early Devonian Intrusive Rocks in the Central Part of the Beishan Orogenic Belt and the Mechanism of Continental Crustal Accretion Reflected by Them[J]. Geological Survey and Research, 2020, 43(3): 207-211.
- [11] 王小红, 杨建国, 谢 燮, 等. 甘肃北山红石山基性—超基性岩体的成因类型及构造意义[J]. 西北地质, 2013, 46(1): 40-55.  
WANG Xiao-hong, YANG Jian-guo, XIE Xie, et al. The Genetic Type and Tectonic Significance of Hongshishan Basic-ultrabasic Rocks in Beishan, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2013, 46(1): 40-55.
- [12] ZHENG R G, WU T R, ZHANG W, et al. Geochronology and Geochemistry of Late Paleozoic Magmatic Rocks in the Yinwaxia Area, Beishan; Implications for Rift Magmatism in the Southern Central Asian Orogenic Belt[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 91: 39-55.
- [13] 闫海卿, 赵焕强, 丁瑞颖, 等. 甘肃北山大山头基性杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 西北地质, 2012, 45(4): 216-228.  
YAN Hai-qing, ZHAO Huan-qiang, DING Rui-ying, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of the Dashantou Basic Complex and Its Geological Significance in Beishan Area, Gansu Province [J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 216-228.
- [14] 杨建国, 王 磊, 王小红, 等. 甘肃北山地区黑山铜镍矿化基性—超基性杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 2012, 31(2/3): 448-454.  
YANG Jian-guo, WANG Lei, WANG Xiao-hong, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Heishan Mafic-ultramafic Complex in the Beishan Area of Gansu Province and Its Geological Significance[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(2/3): 448-454.
- [15] 徐 刚, 汤中立, 王亚磊, 等. 甘肃北山黑山岩浆铜镍硫化物矿床橄榄石特征及成因意义[J]. 矿床地质, 2012, 31(5): 1075-1086.  
XU Gang, TANG Zhong-li, WANG Ya-lei, et al. Features and Genetic Significance of Olivine from Heishan Magmatic Sulfide Ore-bearing Intrusion in Beishan Area, Gansu Province [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(5): 1075-1086.
- [16] 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 甘肃北山墩墩山一带泥盆系三个井组与墩墩山群火山岩地球化学特征及形成环境[J]. 地质论评, 2015, 61(增 1): 730-732.  
WANG Guo-qiang, LI Xiang-min, XU Xue-yi, et al. Geochemical Characteristics and Formation Environment of Three Devonian Well Groups and Volcanic Rocks in Dun Mountain Area, Gansu Province [J]. Geological Review, 2015, 61(S1): 730-732.
- [17] 马博骋. 甘肃北山二叠纪镁铁—超镁铁质岩体岩浆作用与镍铜成矿[D]. 西安: 长安大学, 2023.  
MA Bo-cheng. Magmatism and Ni-Cu Mineralization of Permian Mafic-ultramafic Intrusions in Gansu Beishan Area, NW China [D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [18] 付 超, 李俊建, 张 帅, 等. 中蒙边界地区侵入岩时空分布特征及对构造演化的启示[J]. 华北地质, 2023, 46(1): 1-19.  
FU Chao, LI Jun-jian, ZHANG Shuai, et al. The Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Intrusive Rocks in the Border Area Between China and Mongolia and Its Implications for Tectonic Evolution [J]. North China Geology, 2023, 46(1): 1-19.
- [19] 张正平, 辛后田, 程海峰, 等. 内蒙古北山造山带发现额勒根蛇绿岩: 红石山—百合山蛇绿岩带东延的证据[J]. 地质通报, 2020, 39(9): 1389-1403.

- ZHANG Zheng-ping, XIN Hou-tian, CHENG Hai-feng, et al. The Discovery of the Elegen Ophiolite in Beishan Orogenic Belt, Inner Mongolia; Evidence for the East Extension of the Hongshishan-Baiheshan Ophiolite Belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(9):1389-1403.
- [20] 陈阳阳, 段俊, 徐刚, 等. 甘肃北山地区晚三叠世煌斑岩地球化学特征及构造意义[J]. *西北地质*, 2024, 57(6):78-94.
- CHEN Yang-yang, DUAN Jun, XU Gang, et al. Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Late Triassic Lamprophyre in the Beishan Region, Gansu Province[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(6):78-94.
- [21] 高文彬, 钱壮志, 徐刚, 等. 甘肃北山地区古堡泉辉绿岩脉地球化学特征及其地质意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2020, 42(5):622-636.
- GAO Wen-bin, QIAN Zhuang-zhi, XU Gang, et al. Geochemical Characteristics of Gubaoquan Dolerite Dykes in Beishan Area of Gansu, China and Their Geological Significance[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2020, 42(5):622-636.
- [22] 代新宇, 赵鹏彬, 罗乾周, 等. 内蒙古西部北山成矿带成矿规律研究[J]. *陕西地质*, 2023, 41(2):76-84.
- DAI Xin-yu, ZHAO Peng-bin, LUO Qian-zhou, et al. Regional Mineralisation Pattern of the Eastern Beishan Orogenic Belt, Inner Mongolia[J]. *Geology of Shaanxi*, 2023, 41(2):76-84.
- [23] 唐锐, 罗乾周, 赵鹏彬. 内蒙北山白云山一带奥陶纪火山岩地球化学特征及构造意义[J]. *陕西地质*, 2019, 37(2):1-11.
- TANG Yue, LUO Qian-zhou, ZHAO Peng-bin. Geochemistry and Tectonic Significance of Ordovician Volcanic Rocks in Baiyun Mountain, Beishan, Inner Mongolia[J]. *Geology of Shaanxi*, 2019, 37(2):1-11.
- [24] 胡小春, 杨镇熙, 康维良, 等. 甘肃北山前红泉二长花岗岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 2023, 43(4):49-59.
- HU Xiao-chun, YANG Zhen-xi, KANG Wei-liang, et al. Zircon U-Pb Age, Geochemical Characteristics and Its Geological Significance of the Qianhongquan Monzonite in Beishan Area, Gansu Province[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2023, 43(4):49-59.
- [25] 段霄龙, 田健, 辛后田, 等. 北山造山带洗柳河—洗肠井蛇绿岩带南侧晚泥盆世 A 型花岗岩成因及其对造山带演化的约束[J]. *地质通报*, 2024, <https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20240708.1738.008>.
- DUAN Xiao-long, TIAN Jian, XIN Hou-tian, et al. The Origin of the Late Devonian A-type Granites in the South of Hongliuhe-Xichangjing Ophiolites and Constraints on the Evolution of the Beishan Orogenic Belts[J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, <https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20240708.1738.008>.
- [26] 王鑫玉, 袁超, 龙晓平, 等. 北山造山带尖山和石板井花岗岩年代学、地球化学研究及其地质意义[J]. *地球化学*, 2018, 47(1):63-78.
- WANG Xin-yu, YUAN Chao, LONG Xiao-ping, et al. Geochronological, Geochemical, and Geological Significance of Jianshan and Shibanjing Granites in the Gongpoquan Arc, Beishan Orogenic Belt[J]. *Geochimica*, 2018, 47(1):63-78.
- [27] 张国鹏. 甘肃北山泥盆纪镁铁—超镁铁质岩体成岩成矿作用及构造背景研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- ZHANG Guo-peng. Study on Diagenesis and Mineralization of Devonian Mafic-ultramafic Intrusions in Beishan District, Gansu Province, and the Significance of Tectonic Setting[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [28] 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 北山石炭纪—二叠纪火山岩成因及构造背景[J]. *岩石矿物学杂志*, 2018, 37(6):884-900.
- WANG Guo-qiang, LI Xiang-min, XU Xue-yi, et al. Petrogenesis and Tectonic Setting of the Carboniferous and Permian Volcanic Rocks in the Beishan Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2018, 37(6):884-900.
- [29] 孙海瑞, 吕志成, 于晓飞, 等. 甘肃柳园地区晚三叠世辉绿岩脉年代学和地球化学研究及其对北山造山带早中生代构造演化的指示[J]. *岩石学报*, 2020, 36(6):1755-1768.
- SUN Hai-rui, LYU Zhi-cheng, YU Xiao-fei, et al. Early Mesozoic Tectonic Evolution of Beishan Orogenic Belt: Constraints from Chronology and Geochemistry of the Late Triassic Diabase Dyke in Liuyuan Area, Gansu Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(6):1755-1768.
- [30] 杨合群, 李英, 赵国斌, 等. 北山蛇绿岩特征及构造属性[J]. *西北地质*, 2010, 43(1):26-36.
- YANG He-qun, LI Ying, ZHAO Guo-bin, et al. Character and Structural Attribute of the Beishan Ophiolite[J]. *Northwestern Geology*, 2010, 43(1):26-36.
- [31] 杨合群, 李英, 杨建国, 等. 北山造山带的基本成矿特征[J]. *西北地质*, 2006, 39(2):78-95.
- YANG He-qun, LI Ying, YANG Jian-guo, et al. Main Metallogenic Characteristics in the Beishan Orogen[J]. *Northwestern Geology*, 2006, 39(2):78-95.

- [32] 徐 翠,张正平,蔡晓宇,等. 内蒙古北山地区蒜井子一带晚奥陶世花岗岩地球化学特征及构造环境分析[J]. 华北地质, 2023, 46(3): 35-42.  
XU Cui, ZHANG Zheng-ping, CAI Xiao-yu, et al. Geochemical Characteristics and Tectonic Environment of Late Ordovician Intrusive Rocks in Suanjingzi, Beishan Area, Inner Mongolia [J]. North China Geology, 2023, 46(3): 35-42.
- [33] LIU Y S, GAO S, HU Z C, et al. Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt-peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths [J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [34] LUDWIG K R. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [R]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003.
- [35] SCHERER E, MUNKER C, MEZGER K. Calibration of the Lutetium-hafnium Clock [J]. Science, 2001, 293: 683-687.
- [36] BOUVIER A, VERVOORT J D, PATCHETT P J. The Lu-Hf and Sm-Nd Isotopic Composition of CHUR: Constraints from Unequilibrated Chondrites and Implications for the Bulk Composition of Terrestrial Planets [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 273(1/2): 48-57.
- [37] GRIFFIN W L, PEARSON N J, BELOUSOVA E, et al. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(1): 133-147.
- [38] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.  
WU Yuan-bao, ZHENG Yong-fei. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [39] MIDDLEMOST E A K. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System [J]. Earth-science Reviews, 1994, 37(3/4): 215-224.
- [40] WINCHESTER J A, FLOYD P A. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements [J]. Chemical Geology, 1977, 20: 325-343.
- [41] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [42] 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 等. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究 [J]. 科学通报, 2005, 50(18): 78-88.  
ZHU Yong-feng, ZHANG Li-fei, GU Li-bing, et al. The Zircon SHRIMP Chronology and Trace Element Geochemistry of the Carboniferous Volcanic Rocks in Western Tianshan Mountains [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(18): 78-88.
- [43] ZINDLER A, HART S. Chemical Geodynamics [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1986, 14: 493-571.
- [44] 李 舫, 王 涛, 童 英, 等. 北山柳园地区双峰山早泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造演化意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(5): 407-422.  
LI Shan, WANG Tao, TONG Ying, et al. Identification of the Early Devonian Shuangfengshan A-type Granites in Liuyuan Area of Beishan and Its Implications to Tectonic Evolution [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2009, 28(5): 407-422.
- [45] 李小菲, 张成立, 李 雷, 等. 甘肃北山明舒井岩体形成年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2015, 31(9): 2521-2538.  
LI Xiao-fei, ZHANG Cheng-li, LI Lei, et al. Formation Age, Geochemical Characteristics of the Mingshujing Pluton in Beishan Area of Gansu Province and Its Geological Significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(9): 2521-2538.
- [46] RUDNICK R L, GAO S. Composition of the Continental Crust [J]. Treatise on Geochemistry, 2003, 3: 1-64.
- [47] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 185-220.  
WU Fu-yuan, LI Xian-hua, ZHENG Yong-fei, et al. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Application in Petrology [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2): 185-220.
- [48] 郭文琳, 苏文博, 张 健, 等. 天津蓟县铁岭组新剖面钾质斑脱岩锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素研究 [J]. 岩石学报, 2019, 35(8): 2433-2454.  
GUO Wen-lin, SU Wen-bo, ZHANG Jian, et al. Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopes of K-bentonites from the Tieling Formation in a New Exposure of the Jixian Section, Tianjin, North China Craton [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(8): 2433-2454.
- [49] TARNEY J, JONES C E. Trace Element Geochemistry of Orogenic Igneous Rocks and Crustal Growth Models [J]. Journal of the Geological Society, 1994,

- 151(5):855-868.
- [50] NALDRETT A J, Magmatic Sulfide Deposits; Geology, Geochemistry and Exploration[M]. Berlin: Springer, 2004.
- [51] NEAL C R, MAHONEY J J, CHAZEY W J. Mantle Sources and the Highly Variable Role of Continental Lithosphere in Basalt Petrogenesis of the Kerguelen Plateau and Broken Ridge LIP; Results from ODP Leg 183[J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43(7): 1177-1205.
- [52] ZHANG Z C, MAO J W, CHAI F M, et al. Geochemistry of the Permian Kalatongke Mafic Intrusions, Northern Xinjiang, Northwest China; Implications for the Genesis of Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits[J]. *Economic Geology*, 2009, 104(2): 185-203.
- [53] 吕鑫, 于晓飞, 杜泽忠, 等. 甘肃北山南带晚泥盆世岩浆事件: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素体系约束[J]. *岩石学报*, 2022, 38(3): 693-712.
- LYU Xin, YU Xiao-fei, DU Ze-zhong, et al. Late Devonian Magmatic Event in the South Beishan Orogenic Belt, Gansu; Constraints from Zircon U-Pb Chronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(3): 693-712.
- [54] WOODHEAD J D, HERGT J M, DAVIDSON J P, et al. Hafnium Isotope Evidence for 'Conservative' Element Mobility During Subduction Zone Processes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192(3): 331-346.
- [55] SAUNDERS A D, NORRY M J, TARNEY J. Origin of MORB and Chemically Depleted Mantle Reservoirs; Trace Element Constraints [J]. *Journal of Petrology*, 1988, 29(S1): 425-445.
- [56] 李华芹, 梅玉萍, 屈文俊, 等. 新疆坡北基性—超基性岩带 10 号岩体 SHRIMP U-Pb 和矿石 Re-Os 同位素定年及其意义[J]. *矿床地质*, 2009, 28(5): 633-642.
- LI Hua-qin, MEI Yu-ping, QU Wen-jun, et al. SHRIMP Zircon U-Pb and Re-Os Dating of No. 10 Intrusive Body and Associated Ores in Pobei Mafic-ultramafic Belt of Xinjiang and Its Significance [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(5): 633-642.
- [57] 焦建刚, 郭天牧, 闫馨云, 等. 内蒙古中部额布图铜镍硫化物矿床形成时代与岩石成因 [J]. *地球科学与环境学报*, 2023, 45(5): 1063-1079.
- JIAO Jian-gang, GUO Tian-mu, YAN Xin-yun, et al. Formation Age and Petrogenesis of Ebutu Cu-Ni Sulfide Deposit in Central Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2023, 45(5): 1063-1079.
- [58] 王佳新, 焦建刚, 马云飞, 等. 内蒙古中部乌兰陶勒盖铜镍矿床形成时代与岩浆源区 [J]. *现代地质*, 2024, 38(4): 991-1012.
- WANG Jia-xin, JIAO Jian-gang, MA Yun-fei, et al. Formation Age and Magmatic Source of the Wulantaolegai Cu-Ni Deposit in Central Inner Mongolia [J]. *Geoscience*, 2024, 38(4): 991-1012.