第 59 卷 第 5 期
2026 年（总 249 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 5
2026(Sum249)



引文格式：姜文尧，彭义伟，顾雪祥，等. 西昆仑岔路口马鞍山铜镍矿化辉长岩成因：来自元素地球化学和 Sr-Nd-S 同位素的制约[J]. 西北地质，2026，59(5)：115−130. DOI：10.12401/j.nwg.2025188

Citation：JIANG Wenyao，PENG Yiwei，GU Xuexiang，et al. Genesis of Maanshan Gabbro Associated with Crossroads Cu-Ni Mineralization in Karakoram：Constraints from Elemental Geochemistry and Sr-Nd-S Isotopes[J]. Northwestern Geology，2026，59(5)：115−130. DOI：10.12401/j.nwg.2025188

西昆仑岔路口马鞍山铜镍矿化辉长岩成因：来自元素地球化学和 Sr-Nd-S 同位素的制约

姜文尧[1]，彭义伟[1,*]，顾雪祥[2]，章永梅[2]，刘超[3]，刘亚楠[3]，张焱[1]，秦博[1]

（1. 成都理工大学地球与行星科学学院，四川 成都 610059；2. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，北京 100083；3. 新疆维吾尔自治区地质研究院，新疆 乌鲁木齐 830000）

摘 要：新疆西昆仑岔路口马鞍山三叠纪镁铁–超镁铁质岩体是近年新发现的铜镍矿化点，但其岩石成因与成矿潜力尚未得到充分约束。笔者通过对马鞍山辉长岩开展系统的岩石学、全岩地球化学、Sr-Nd 同位素及硫化物原位 S 同位素研究，旨在揭示其岩浆演化过程、源区属性、构造背景及硫饱和机制，以深化对区域岩浆–成矿规律的认识，并为找矿突破提供依据。辉长岩具有轻稀土富集、重稀土亏损的右倾型稀土配分模式，其微量元素富集 Nb、Ta 等高场强元素，亏损 Ba、K 等大离子亲石元素，与洋岛玄武岩（OIB）一致。辉长岩具有较高的 $(Th/Yb)_{PM}$（1.35～7.10）和较低的 Ce/Pb（10.74～22.51）、Nb/Ta（12.27～16.05）值，表明其经历了地壳混染；MgO 与 Cr 和 Ni 呈正相关关系，表明岩浆演化过程中存在橄榄石和单斜辉石的分离结晶。辉长岩的全岩 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值为 0.703 50～0.703 58，$\varepsilon_{Nd}(t)$ 值为+5.0～+5.5，具有强烈的亏损特征，其较低的 La/Nb（0.80～1.17）、La/Ta（10.3～14.6）、Dy/Yb（2.16～2.43）值，指示其岩浆源区为以橄榄岩为主的亏损软流圈地幔。马鞍山辉长岩具有正的 δNb 值（0.13～0.14）及高地幔潜能温度（Tp=1 574～1 616 ℃）。结合区内发育的基性岩浆活动及深海相火山–沉积序列，认为马鞍山辉长岩与地幔柱构造背景形成的洋岛–海山玄武岩相似。辉长岩中浸染状黄铁矿和黄铜矿的 $\delta^{34}S$ 值分别为+3.27‰～+4.23‰和−3.59‰～−2.06‰，偏离地幔硫范围，指示地壳混染是导致硫饱和和硫化物熔离的主要机制。马鞍山岩体地表镍华及辉长岩偏低的 M/F 值（0.94～1.15），共同指示岩体深部具备一定的找矿前景，仍需进一步勘查。

关键词：辉长岩；铜镍矿；岩浆源区；硫饱和机制；马鞍山；新疆西昆仑

中图分类号：P611；P595 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0115-16

Genesis of Maanshan Gabbro Associated with Crossroads Cu-Ni Mineralization in Karakoram: Constraints from Elemental Geochemistry and Sr-Nd-S Isotopes

JIANG Wenyao[1], PENG Yiwei[1,*], GU Xuexiang[2], ZHANG Yongmei[2], LIU Chao[3], LIU Yanan[3], ZHANG Yan[1], QIN Bo[1]

收稿日期：2026-01-26；**修回日期**：2026-04-08；**责任编辑**：曹佰迪

基金项目：新疆维吾尔自治区科技计划资助项目（2023B03016），深地国家科技重大专项（2024ZD1001806）联合资助。

作者简介：姜文尧（2002−），男，硕士研究生，研究方向为资源勘查和矿床学。E-mail：2013731366@qq.com。

*通讯作者：彭义伟（1987−），男，副教授，硕士生导师，从事矿床学教学与相关研究。E-mail：pengyiwei15@cdut.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

（1. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China；2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China；3. Geological Research Academy of Xinjiang School of Earth Science and Resources, Wulumuqi 830000, Xinjiang, China）

Abstract：The Triassic mafic-ultramafic complex at Maanshan in the Chalukou area of the West Kunlun, Xinjiang, represents a recently discovered copper-nickel mineralization occurrence. However, its petrogenesis and ore-forming potential remain poorly constrained. This study conducts systematic petrographic, whole-rock geochemical, Sr-Nd isotopic, and in situ sulfur isotopic analyses of sulfide minerals from the Maanshan gabbro, aiming to reveal its magmatic evolution, source characteristics, tectonic setting, and sulfur saturation mechanisms, thereby enhancing the understanding of regional magmatism and mineralization processes and providing insights for prospecting breakthroughs. The gabbro exhibits right-inclined chondrite-normalized rare earth element patterns with light rare earth element enrichment and heavy rare earth element depletion. Its trace element signatures show enrichment in high field strength elements (e.g., Nb, Ta) and depletion in large ion lithophile elements (e.g., Ba, K), consistent with ocean island basalt (OIB) affinities. Elevated $(Th/Yb)_{PM}$ ratios (1.35–7.10) and low ratios of Ce/Pb (10.74–22.51), and Nb/Ta (12.27–16.05) indicate significant crustal contamination. Positive correlations between MgO and Cr/Ni suggest fractional crystallization of olivine and clinopyroxene during magmatic evolution. Whole-rock initial $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ ratios range from 0.703 50 to 0.703 58, with $\varepsilon_{Nd}(t)$ values of +5.0 to +5.5, reflecting a strongly depleted mantle source. Low ratios of La/Nb (0.80–1.17), La/Ta (10.3–14.6), and Dy/Yb (2.16–2.43) further suggest that the primary magma was derived from a depleted asthenospheric mantle dominated by peridotite. Positive δNb values (0.13~0.14) and high mantle potential temperatures (Tp = 1 574–1 616 ℃) of the Maanshan gabbro, combined with regional basaltic magmatism and deep-marine volcanic-sedimentary sequences, support a tectonic setting related to mantle plume activity, analogous to ocean island-seamount basalts. In situ $\delta^{34}S$ values of disseminated pyrite and chalcopyrite range from +3.27‰ to +4.23‰ and –3.59‰ to –2.06‰, respectively, deviating from typical mantle sulfur values and indicating that crustal contamination was the primary mechanism triggering sulfur saturation and sulfide segregation. The occurrence of surface annabergite together with the relatively low M/F ratio (0.94–1.15) of the gabbro in the Maanshan intrusion suggests favorable prospecting potential at depth, warranting further exploration.

Keywords：gabbro；copper-nickel deposit；magma source area；sulfide saturation mechanism；Maanshan；West Kunlun in Xinjiang

铜、镍、钴作为全球重要的关键金属，在新兴产业快速发展的背景下，全球对铜、镍、钴等金属的需求呈现井喷式增长（侯增谦等, 2020; 张照伟等, 2024）。岩浆铜镍钴硫化物矿床是铜、镍、钴资源的重要成矿载体（陈实等, 2025；高晓峰等, 2025），这类矿床贡献了全球超过一半的镍、钴资源（汤中立等, 1995; Naldrett, 2004）。岩浆铜镍钴硫化物矿床主要形成于核幔边界的地幔柱和离散的大陆裂谷等构造背景（Arndt, 2003），如南非 Bushveld、俄罗斯 Noril'sk、中国力马河等矿床的成因均被认为与地幔柱活动相关（Zhou et al., 2008; Krivolutskaya et al., 2012; Magson et al., 2024），中国金川铜镍硫化物矿床的形成则与 Rodinia 超大陆的聚合与裂解过程有关（Lv et al., 2018）。中国天山、北山及东昆仑等造山带中多处铜镍钴硫化物矿床的发现表明，该类矿床亦可形成于汇聚板块构造背景（Wei et al., 2013; Liu et al., 2018；张翔等, 2025；张愿宁等, 2025）。特别是东昆仑造山带夏日哈木超大型矿床的发现进一步证实，汇聚板块边缘的造山带具备形成大型岩浆铜镍钴硫化物矿床的条件（张照伟等, 2024）。西昆仑与东昆仑同属昆仑造山带，自新元古代以来经历了特提斯洋的开合、俯冲与闭合等一系列造山事件（Xiao et al., 2002; 任文林等, 2023；高一杰等, 2026），伴随多期构造–岩浆成矿作用，但铜镍钴矿的找矿勘查并未取得重大突破。

近年来，新疆西昆仑库尔浪–其曼于特和岔路口地区相继发现多处铜镍钴矿床（点），显示出良好的找矿潜力（李惠等, 2020; 秦学文等, 2023）。然而，这些铜镍钴矿床（点）的研究程度较低，制约了西昆仑铜镍钴

矿床成因机制研究和区域找矿勘查。因此, 笔者以西昆仑岔路口地区马鞍山铜镍矿床(点)的辉长岩为研究对象, 开展系统的岩石学、全岩地球化学、全岩 Sr-Nd 同位素和硫化物原位 S 同位素分析, 探讨其岩石成因、构造背景、硫饱和机制等, 为区域地质演化和区域内铜镍钴矿化勘查提供新认识。

1　区域地质概况

西昆仑造山带位于青藏高原西北缘, 被奥依塔格–库地–苏巴什断裂、麻扎–康西瓦断裂、乔尔天山断裂和喀喇昆仑断裂划分为 4 个构造单元, 自北向南依次为北昆仑地体、南昆仑地体、甜水海地体和喀喇昆仑地体(图 1a; 潘裕生, 1990; 张传林等, 2019)。这些微陆块自显生宙以来经历了漫长且复杂的构造演化史, 记录了多期与原–古特提斯洋相关的造山事件(任文林等, 2023)。岔路口地区位于甜水海地体与喀喇昆仑地体结合部, 乔尔天山深大断裂上(魏永峰等, 2016)。区域出露地层主要为二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系(图 1b)。二叠系以下二叠统神仙湾组(P_1s)为代表, 主要岩性为砂岩和砂质板岩, 夹有少量硅质岩、玄武岩、火山角砾岩等。三叠系道腾格湖组($T_{1\text{-}2}d$)包含两段, 一段为基性–超基性火山岩段, 二段为灰岩段; 上河尾滩组(T_3h)以碳酸盐岩和砂岩为主, 夹有少量硅质岩和枕状玄武岩; 克勒青河组(T_3k)为浅变质陆源细碎屑岩(千枚岩、板岩)旋回式沉积夹灰岩。侏罗系和白垩系主要由砂岩和灰岩组成。区域上断裂发育, 乔尔天山–岔路口断裂及其次级断裂纵穿全区, 主要呈 NW–SE 向。受断裂影响, 地层走向与构造方向一致, 总体为单斜地层, 局部发育牵引褶皱及地层倒转。区域上主要发育三叠纪、白垩纪岩浆岩。早—中三叠世, 该区发生基性–超基性岩浆侵位, 伴随后续火山–碎屑沉积, 其中辉绿岩和辉长岩的锆石 U-Pb 年龄主要为 228～254 Ma(魏永峰等, 2016)。至白垩纪, 受 SN 向板块运动影响, 西南部发生花岗质岩浆侵入, 壳源二长花岗岩以岩枝、岩株形式侵位。

2　岩体地质特征

马鞍山岩体位于岔路口地区东部(图 1b、图 2), 该地区已发现多处铜镍(钴)矿点, 如黑石梁、兴雅谷地等。马鞍山岩体出露部分呈不规则断块状、透镜状,

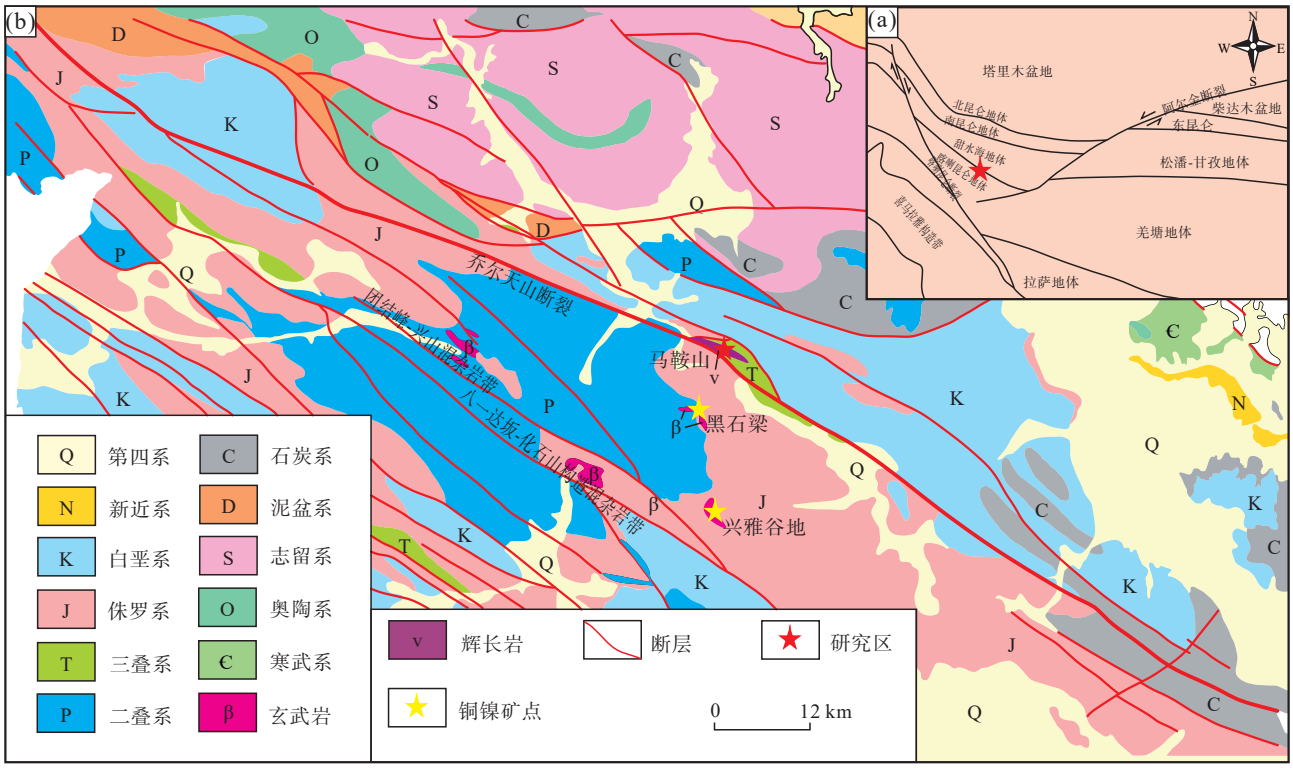


图1　西昆仑地区构造单元简图(a)(据 Zhang et al., 2016 修)和西昆仑岔路口区域地质简图(b)(据周军等, 2014 修)

Fig. 1　(a) Tectonic units map of the Western Kunlun, (b) geological map of the Chalukou area in the Western Kunlun

在长约为 3.21 km, 宽约为 1.52 km 的范围内零散分布, 具体可划分为马鞍山Ⅰ号和Ⅱ号两处岩体。马鞍山Ⅰ号岩体出露面积为 0.000 7～0.032 0 km^2, 总体呈不规则断块状、透镜状、脉状。南部为闪长岩、辉石闪长岩, 靠中部出露极少量的辉长岩, 北部主体出露辉长岩。马鞍山Ⅱ号岩体出露面积约 0.000 1～0.100 0 km^2, 底部呈平缓的南倾, 在近地表位置产状变陡, 向中心靠拢, 总体呈盆状, 深度约为 500 m。Ⅱ号岩体北东部出露大面积辉长岩, 超基性岩出露于南侧边部, 主要为辉石岩、辉橄岩等。镍矿化体主要分布于Ⅰ号岩体最西端和东南端, 可见镍华发育在辉长岩与围岩的外接触带(图 3i)。铜矿化主要分为两种形式: 辉长岩中呈浸染状分布的黄铜矿, Ⅱ号岩体东段重晶石–方解石脉中与气液作用有关的黄铜矿(图 3g、图 3h)。

马鞍山辉长岩呈灰绿色, 中细粒结构, 辉长结构, 块状构造。主要矿物为斜长石、辉石、橄榄石和绿泥石。其中, 斜长石(50%)多呈自形柱状, 局部可见聚片双晶(图 4a)。辉石(40%)呈半自形–自形粒状、柱状, 两组近直交解理较明显(图 4b)。橄榄石(5%)呈粒状, 大小为 0.1～0.2 mm(图 4b、图 4c)。绿泥石(5%)为蚀变矿物, 呈片状、鳞片状不均匀分布于斜长石和辉石之间。矿化辉长岩中, 黄铁矿呈自形粒状, 星点浸染状分布; 黄铜矿呈自形–半自形粒状, 常与黄铁矿共生, 有时呈共边结构(图 4d)。辉长岩中后期热液活动强烈, 发育方解石–重晶石–硫化物脉。重晶石–方解石脉中硫化物主要为黄铜矿和黄铁矿, 呈半自形–自形粒状(图 4e)。此外, 脉中可见少量呈自形板状、针状的钛铁矿(图 4f), 部分发生白钛石化。

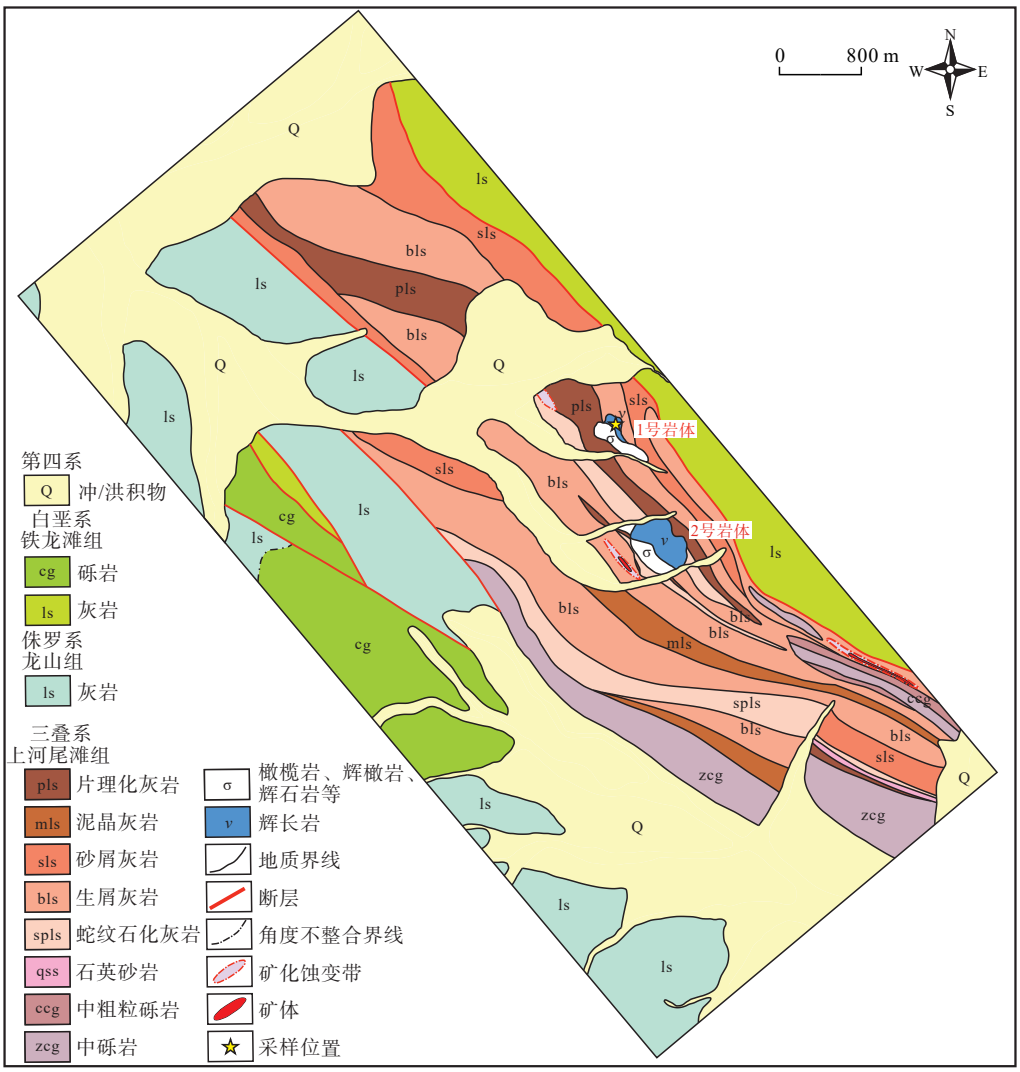


图2 马鞍山地质简图及采样点位置(据新疆维吾尔自治区地质调查院, 2022)

Fig. 2 Geological map of the Mashan area and sample locations

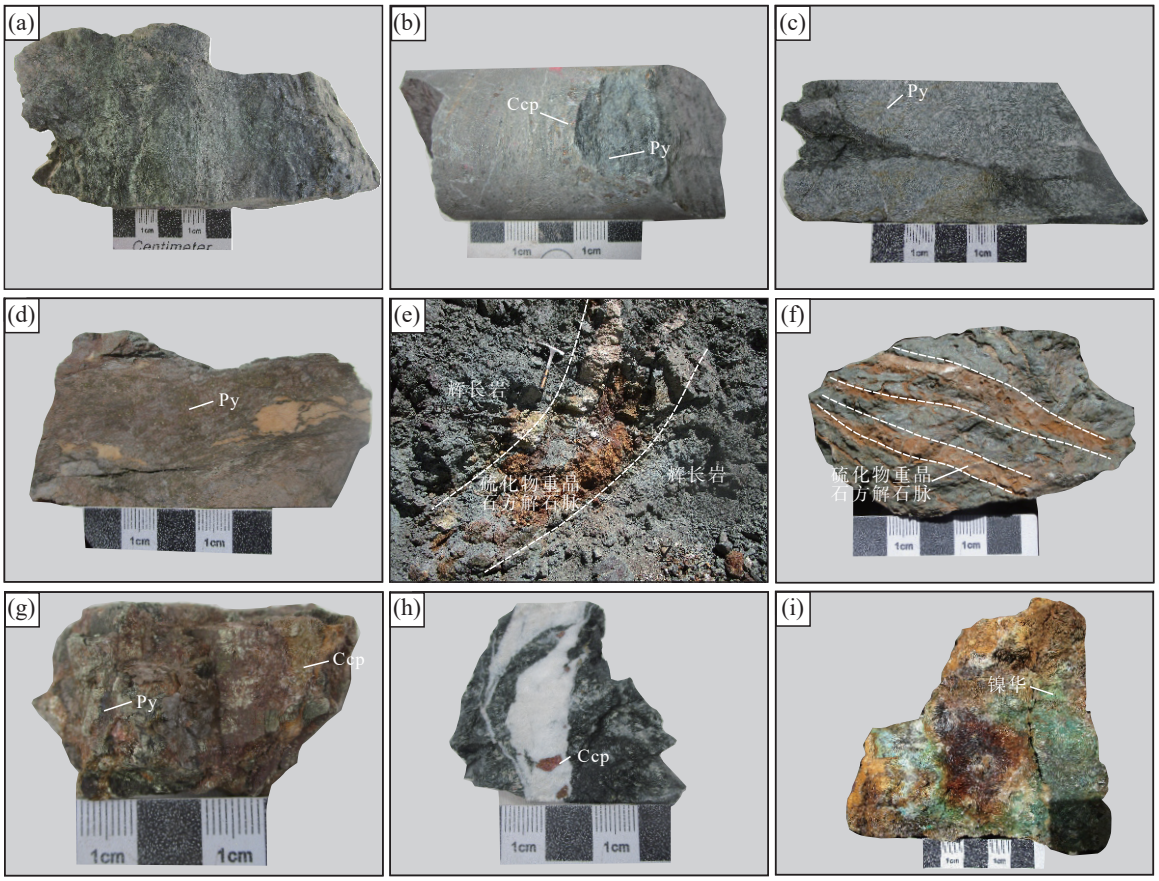
3　样品采集与测试方法

笔者对采自马鞍山 I 号岩体的新鲜、弱蚀变辉长岩样品进行了全岩主微量元素和 Sr-Nd 同位素分析，并对辉长岩中的浸染状黄铁矿、黄铜矿开展了原位微区硫同位素分析。

全岩主微量元素测定由南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成。新鲜样品粉碎研磨至 200 目以下，105 ℃ 烘干后与无水偏硼酸锂置于 1 000 ℃ 马弗炉中熔融，溶解于 5% 王水定容，采用 HORIBA 公司的 ICP-OES 测定主量元素，相对误差<3%。微量元素采用 Agilent 7 900 ICP-MS 分析，样品经封闭压力酸溶法于 190 ℃ 消解，所得数据经国际标准样品（如玄武岩 BCR-2、玄武岩 BHVO-2 及安山岩 AGV-2 等）进行验证，确保误差<10%。

全岩 Sr-Nd 同位素分析由南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成。样品经提纯后，将 Sr 和 Nd 组分分别配制成约 50×10^{-9} 的溶液，采用 Neptune Plus MC-ICP-MS 测定同位素比值。Sr 同位素以 $^{86}Sr/^{88}Sr = 0.119\,4$ 校正质量分馏，采用国际标准物质 NIST SRM 987 监控仪器漂移；Nd 同位素以 $^{146}Nd/^{144}Nd = 0.721\,9$ 校正，采用标准物质 JNdi-1 监控漂移。在化学前处理及质谱测定时，同步插入 USGS 系列标准物质（包括玄武岩 BCR-2、BHVO-2 以及安山岩 AGV-2 等）和重复样作为质量控制盲样，确保实验误差处于受控范围。

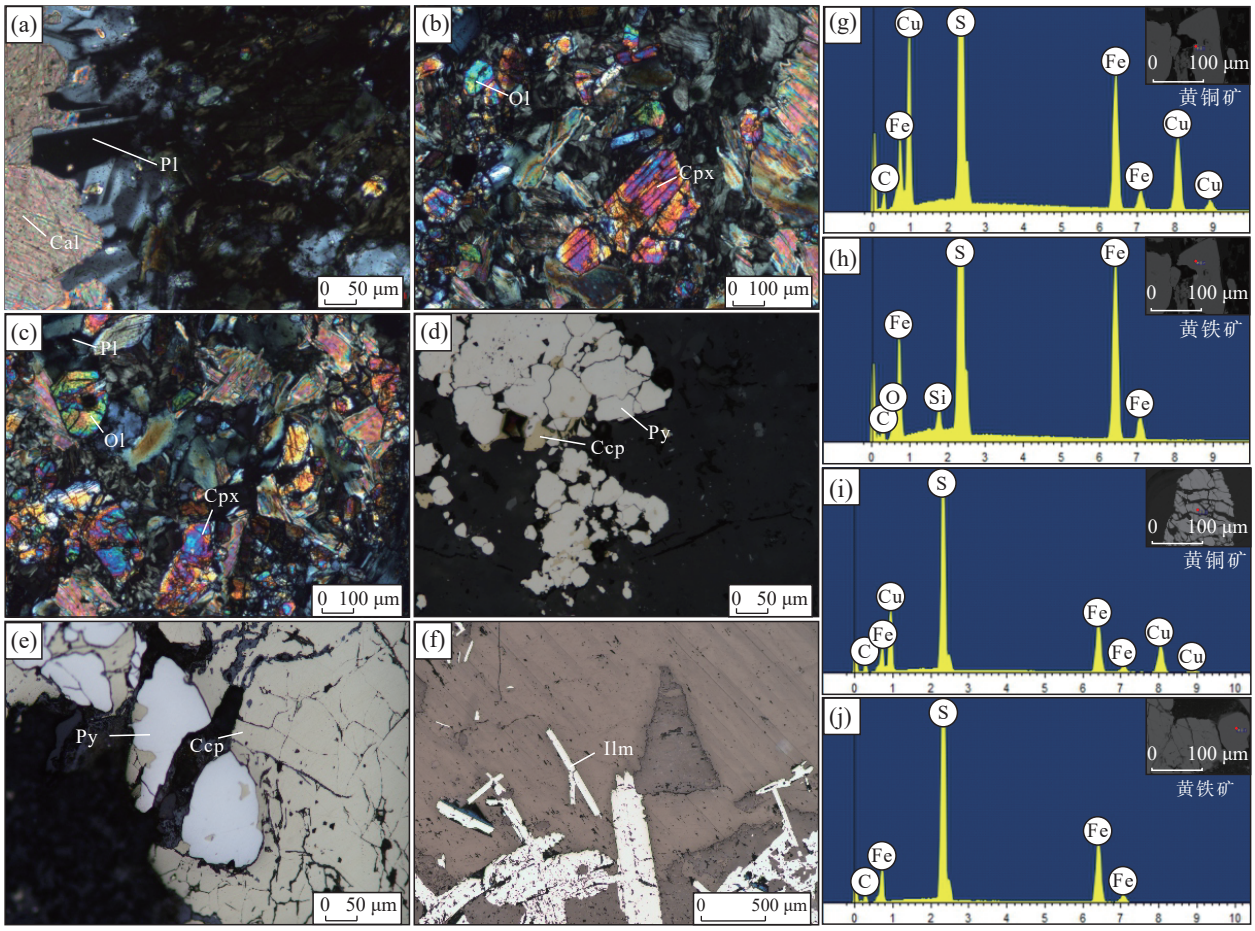
LA-MC-ICP-MS 原位微区硫同位素分析在北京科荟测试技术有限公司完成。测试分析采用 Thermo Scientific Neptune Plus 型 MC-ICP-MS 和与之连用的 RESOlution S155 193 nm 固体激光器。实验条件为：单点剥蚀，剥蚀束斑直径为 20 μm，能量密度为 3 J/cm^2，频率 5 Hz。以氦气为载气，^{32}S 和 ^{34}S 用法拉第杯静态同时接收，积分时间为 0.131 s，共采集数据 9 组，共需时 1 s。采用基质匹配标样及标样–样品间插法进行质



a. 采于 Ⅰ 号岩体的辉长岩，轻微蚀变；b. 辉长岩中发育浸染状黄铁矿和黄铜矿；c. 蚀变辉长岩中可见浸染状黄铁矿；d. 褐铁矿化辉长岩中的浸染状黄铁矿；e. Ⅱ 号岩体东部的重晶石–方解石–硫化物脉；f. 硫化物–重晶石–方解石脉；g. 重晶石–方解石–硫化物脉中发育褐铁矿化和黄铁矿、黄铜矿；h. 辉长岩中发育重晶石–方解石脉，脉中可见黄铜矿；i.. 次生氧化作用形成的镍华；Py. 黄铁矿；Ccp. 黄铜矿

图3　马鞍山矿体和矿石特征

Fig. 3　Characteristics of orebodies and ores in the Maanshan area



a. 辉长岩中见方解石细脉和发育较自形的斜长石；b.辉长岩中见自形的辉石和少量的橄榄石；c. 辉长岩发育斜长石、辉石和橄榄石；d. 辉长岩中的黄铜矿和黄铁矿；e. 重晶石–方解石脉中的黄铜矿和黄铁矿；f. 重晶石–方解石脉中的自形钛铁矿；g. 辉长岩中黄铜矿的能谱图；h. 辉长岩中黄铁矿的能谱图；i. 重晶石–方解石脉中黄铜矿的能谱图；j. 重晶石–方解石脉中黄铁矿的能谱图；Cal. 方解石；Cpx. 单斜辉石；O. 橄榄石；Pl. 斜长石；Ccp. 黄铜矿；Ilm. 钛铁矿；Py. 黄铁矿

图4 马鞍山辉长岩显微照片(a~f)及硫化物能谱图(g~j)

Fig. 4 (a~f) Microscopic photographs and (g~j) EDS spectra of sulfides from the Maanshan gabbro

量歧视校正，分析精度优于±0.73‰。

4 测试结果

4.1 主量元素

马鞍山辉长岩的 LOI 值为 1.24%～1.79%，平均为 1.53%(表 1)。SiO_2 含量为 45.77%～46.75%，平均为 46.73%，属于基性岩。MgO 含量为 6.17%～7.37%，平均为 6.85%。TiO_2 含量为 2.02%～2.36%，平均为 2.15%。K_2O 含量为 0.29%～0.38%，平均为 0.34%。Na_2O 含量为 2.73%～3.42%，平均为 3.15%。在 TAS 图解和 Zr/TiO_2-Nb/Y 图解中，样品分别落入辉长岩和碱性玄武岩范围(图 5a、图 5b)，结合 TiO_2-TFe_2O_3/MgO 图解和 AFM 图解(图 5c、图 5d)，表明其母岩浆属碱性拉斑玄武质岩浆。

4.2 稀土元素与微量元素特征

马鞍山辉长岩的稀土元素总量(ΣREE)为 90.79×10^{-6}～121.54×10^{-6}，轻重稀土分异明显(LREE/HREE=4.29～5.25)，无明显 Eu 异常(δEu=1.00～1.03)。稀土元素配分曲线呈现“右倾型”配分模式(图 6)，LREE 相对富集，HREE 相对亏损。在微量元素蛛网图中(图 6)，马鞍山辉长岩的大离子亲石元素(LILE)Ba、K 相对亏损，而高场强元素(HFSE)Nb、Ta 相对富集。Cu 含量为 38.0×10^{-6}～220.8×10^{-6}(平均为 95.2×10^{-6})，Ni 含量为 45.4×10^{-6}～76.1×10^{-6}(平均为 62.2×10^{-6})。

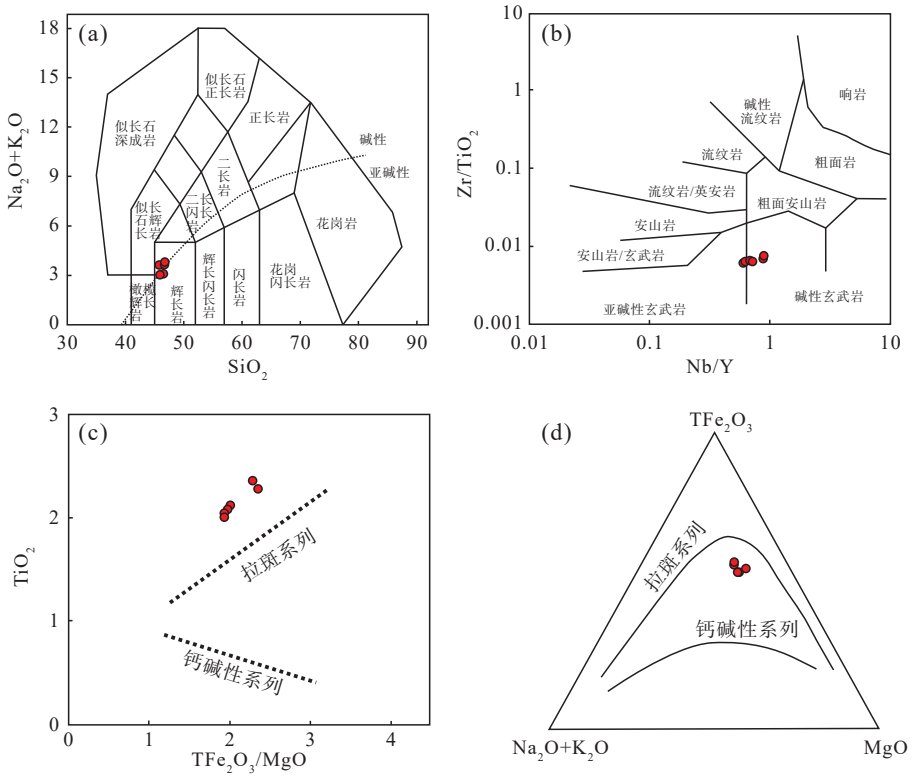
4.3 Sr-Nd 同位素组成

马鞍山辉长岩的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值分别为 0.512 85～0.512 87 和 0.703 67～0.703 77(表 2)。基于相邻基性–超基性岩体年龄 228～254 Ma(魏永峰等，2016; 杨万志等，2021)，采用 t=240 Ma 计算出辉长岩

表 1　马鞍山辉长岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果统计表

Tab. 1　Statistical analysis results of major (%) and trace elements (10^{-6}) for the Maanshan gabbro

样号	SiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	MnO	P_2O_5	LOI	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cs
MAS-1	45.19	15.07	12.39	7.16	11.65	2.69	0.29	1.98	0.17	0.24	1.52	50.73	0.8	0.03	0.2	51.15	277.53	0.31
MAS-2	45.61	15.11	12.58	7.24	11.65	2.7	0.33	2.01	0.18	0.24	1.79	63.46	0.81	0.03	0.16	49.93	270.58	0.5
MAS-3	45.08	14.81	12.82	6.08	11.79	3.27	0.29	2.25	0.18	0.32	1.49	91.45	0.94	0.03	0.19	41.01	113.37	0.13
MAS-4	45.99	14.89	12.26	6.82	11.56	3.35	0.37	2.09	0.18	0.27	1.24	37.56	0.85	0.02	0.15	47.66	131.41	0.5
MAS-5	45.91	15.11	12.18	6.89	11.42	3.27	0.38	2.05	0.18	0.23	1.44	45.22	0.76	0.03	0.14	48.65	149.94	0.4
MAS-15	45.94	15.59	12.77	6.24	10.09	3.36	0.37	2.32	0.19	0.24	1.72	58.8	0.88	0.02	0.2	43.8	97.85	0.17
样号	Cu	Ga	Hf	In	Li	Mo	Nb	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Sr	Ta	Th	Tl	U	V
MAS-1	37.97	22.34	3.34	0.09	16.7	0.76	13.82	76.13	1.48	5.73	0.31	32.52	320.4	1.11	1.25	0.04	0.31	257
MAS-2	51.81	21.83	3.25	0.1	21.41	0.9	12.84	79.5	1.46	7.58	0.2	29.79	330.11	1.05	1.22	0.04	0.32	268.14
MAS-3	91.27	19.73	4.37	0.11	12.2	1.07	24.2	52.3	3.5	2.79	0.28	29.53	326.09	1.51	2.36	0.04	0.52	326.4
MAS-4	79.22	21.2	3.68	0.1	12.84	0.72	21.17	60.41	2.7	6.29	0.19	37.8	284.94	1.51	1.91	0.05	0.42	299.32
MAS-5	89.91	21.39	3.5	0.11	16.09	0.79	16.94	59.61	1.73	6.46	0.1	37.45	272.84	1.25	1.59	0.2	0.35	302.7
MAS-15	220.8	23.77	3.9	0.13	19.67	0.7	19.05	45.37	3.13	6.41	0.1	35.32	287.17	1.49	1.42	0.03	0.33	297.49
样号	W	Zn	Zr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
MAS-1	0.35	79.34	131.72	21.82	15.11	33.36	4.42	17.46	4.9	1.64	4.93	0.77	4.51	0.85	2.26	0.32	1.86	0.25
MAS-2	0.44	80.62	129.05	21.09	15.07	33.11	4.41	16.79	4.76	1.58	4.71	0.73	4.31	0.82	2.05	0.3	1.9	0.25
MAS-3	0.26	86.76	174.67	26.63	22.04	44.12	5.65	22.43	5.87	1.95	5.88	0.92	5.47	1.08	2.89	0.42	2.49	0.34
MAS-4	0.18	73.42	147.05	23.52	18.98	37.92	4.85	17.64	5.05	1.67	5.03	0.78	4.65	0.91	2.21	0.36	2.15	0.3
MAS-5	0.23	77.21	138.96	24.54	16.03	34.3	4.52	18.1	5.05	1.72	5.17	0.82	4.97	0.96	2.64	0.37	2.28	0.3
MAS-15	0.3	82.4	153.79	26.04	15.38	33.66	4.53	16.92	5.31	1.83	5.44	0.87	5.18	1.01	2.57	0.38	2.31	0.32

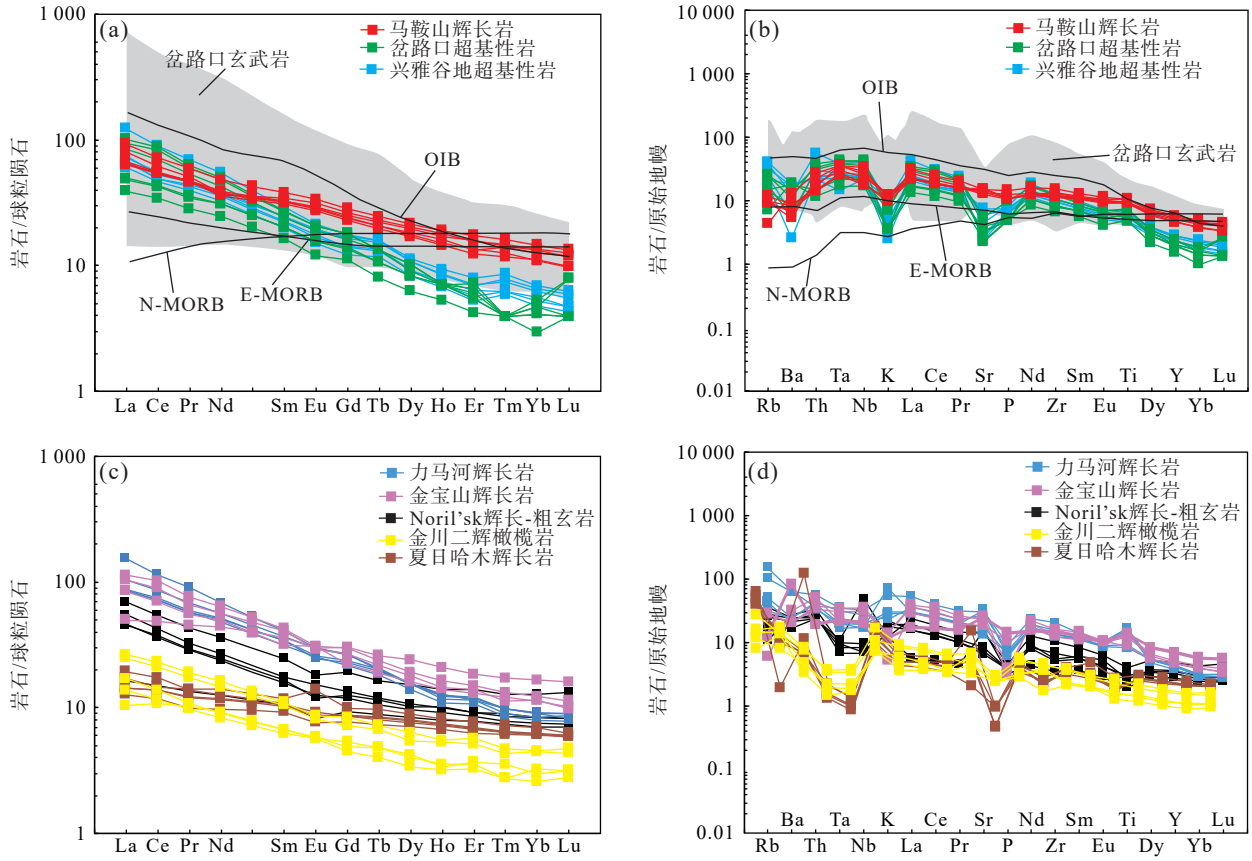


a. 马鞍山辉长岩 TAS 图解据 Irving et al.(1971)；b. Zr/TiO_2-Nb/Y 图解据 Wilson(1989)；

c. TiO_2-TFe_2O_3/MgO 图解据 Frey et al.(1978)；d. AFM 图解据 Kuno(1968)

图5　马鞍山辉长岩主量元素判别图

Fig. 5　Major element discrimination diagram for the Maanshan gabbros



不同地区基性–超基性岩全岩数据引自 Tao et al.(2007)、Zhang et al.(2009)、胡彦强(2012)、Krivolutskaya et al.(2012)、田江涛等(2021)、杨万志等(2021)、任文林等(2023)、张飞飞(2023)、Cheng et al.(2024)

图6 马鞍山辉长岩稀土元素配分型式图(a、c)和微量元素蛛网图(b、d)

Fig. 6 (a、c) REE patterns and (b、d) trace element spider diagrams of the Maanshan gabbro

表 2 马鞍山辉长岩全岩 Sr-Nd 同位素组成

Tab. 2 Whole-rock Sr-Nd isotopic compositions of the from the Maanshan gabbro

样品号	岩性	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	$(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$	$\varepsilon_{Nd}(t)$
MAS-1	辉长岩	0.051 72	0.703 70	0.703 52	0.169 73	0.512 85	0.512 58	5.0
MAS-3	辉长岩	0.024 73	0.703 67	0.703 58	0.157 99	0.512 86	0.512 61	5.4
MAS-4	辉长岩	0.063 85	0.703 72	0.703 50	0.173 11	0.512 86	0.512 59	5.0
MAS-5	辉长岩	0.068 47	0.703 77	0.703 54	0.168 71	0.512 87	0.512 61	5.5

的 $\varepsilon_{Nd}(t)$值和$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$值分别为+5.0～+5.5 和 0.703 50～0.703 58。

4.4 硫化物 S 同位素

马鞍山辉长岩中浸染状黄铁矿和黄铜矿的 $\delta^{34}S$ 值分别为+3.27‰～+4.23‰、−3.59‰～−2.06‰(表 3)。

表 3 马鞍山硫化物 S 同位素组成

Tab. 3 Sulfur isotopic compositions of the Maanshan sulfides

样品号	样品岩性	硫化物种类	$\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$(‰)
81-1	辉长岩	黄铁矿	3.27
81-2	辉长岩	黄铁矿	4.23
81-3	辉长岩	黄铁矿	3.82
81-4	辉长岩	黄铁矿	3.50
81-5	辉长岩	黄铁矿	3.38
81-6	辉长岩	黄铜矿	-2.06
81-7	辉长岩	黄铜矿	-2.16
81-8	辉长岩	黄铜矿	-3.59
81-9	辉长岩	黄铜矿	-2.76

5 讨论

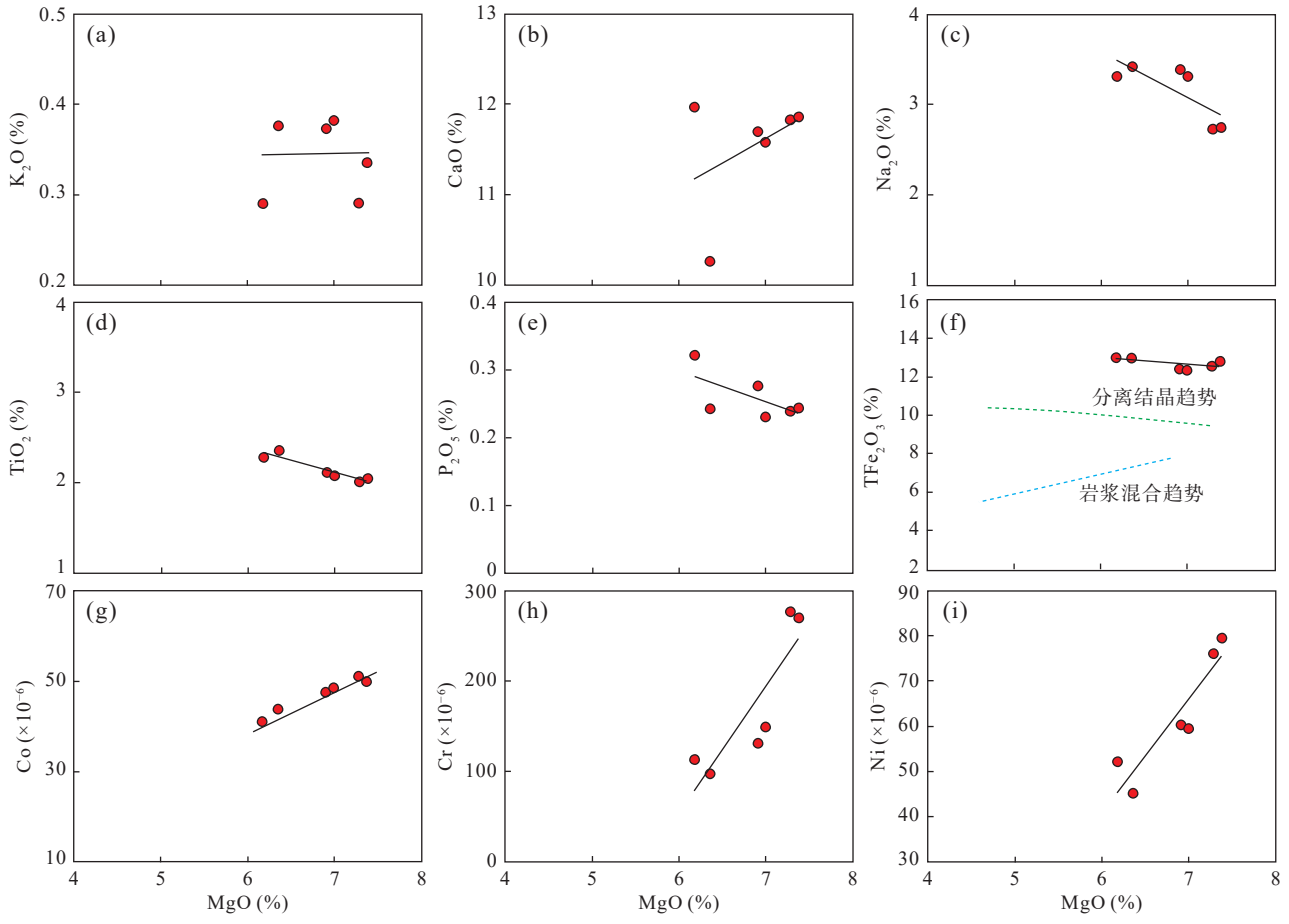
5.1 岩浆演化与岩浆源区

马鞍山辉长岩样品烧失量为 1.24%～1.72%(平均为 1.53%)，蚀变程度较弱。根据利用不活动元素 Zr

判断热液过程中元素迁移程度的方法(Polat et al., 2009, 2012), 辉长岩大部分元素 Rb、La、Ce、Nb、Ta 等均与 Zr 表现出较好的相关性(R 分别为 0.83、0.84、0.86、0.97、0.82), 指示这些元素较好地保存了岩石成岩时的原始特征。

岩相学观察显示, 马鞍山辉长岩含自形橄榄石和辉石, 无反向环带。在 TFe_2O_3-MgO 图解(图 7g)中, 样品沿分离结晶趋势线分布, 呈良好线性关系, 表明岩浆演化过程中以分离结晶作用为主, 无显著岩浆混合证据。辉长岩的 $Mg^{\#}$值(46～51)及 Cr(97.85×10^{-6}～277.53×10^{-6})和 Ni(45.37×10^{-6}～79.50×10^{-6})含量低于原始玄武质岩浆($Mg^{\#}$=68～72; Cr=300×10^{-6}～600×10^{-6}; Ni=300×10^{-6}～400×10^{-6}; Frey et al., 1978), 暗示了岩浆在上升侵位过程中发生了分离结晶作用。在哈克图解中(图 7), Cr 和 Ni 与 MgO 具有较强正相关性, 表明该辉长岩形成过程中经历了橄榄石与单斜辉石的分离结晶。MgO 与 K_2O 及 CaO 相关性较弱, 与 Na_2O 及 TiO_2 呈负相关关系, 表明钛铁氧化物和斜长石的分离结晶不明显, 这与稀土元素配分图(图 6)中 Eu 异常不明显的特征一致(δEu=1.00～1.03)。

幔源岩浆上侵穿过大陆地壳时, 可能会遭受岩浆通道围岩的混染, 导致 P_2O_5 和 TiO_2 显著降低, 同时部分大离子亲石元素和碱金属元素含量相对富集(Zhao et al., 2007)。地壳混染还会引起玄武质岩浆的微量元素含量与 $\varepsilon_{Nd}(t)$变化, 如 $\varepsilon_{Nd}(t)$与 Nb/La 呈正相关关系(Li et al., 2006)。马鞍山辉长岩 P_2O_5 和 TiO_2 与 MgO 呈负相关(图 7e、图 7f), $\varepsilon_{Nd}(t)$与 Nb/La 呈正相关关系(图 8a), 具有地壳混染特征; Ce/Pb 值(10.74～22.51, 平均为 17.08)和 Nb/Ta 值(12.27～16.05, 平均为 13.51)低于地幔岩浆, 但高于大陆地壳(地幔岩浆 Ce/Pb=25±5、Nb/Ta=17.5, 大陆地壳 Ce/Pb<15、Nb/Ta=8～12; Hofmann, 1997; Venier et al., 2022)。辉长岩$(Th/Yb)_{PM}$值为 1.35～7.10(平均为 2.79), 在$(Th/Yb)_{PM}$-$(Ta/Th)_{PM}$图解(图 8b)中, 投点靠近下地壳区域。上述特征表明



分离结晶和岩浆混合曲线据蔺新望等(2023)

图7　马鞍山辉长岩哈克图解

Fig. 7　Harker diagram for the Maanshan gabbro

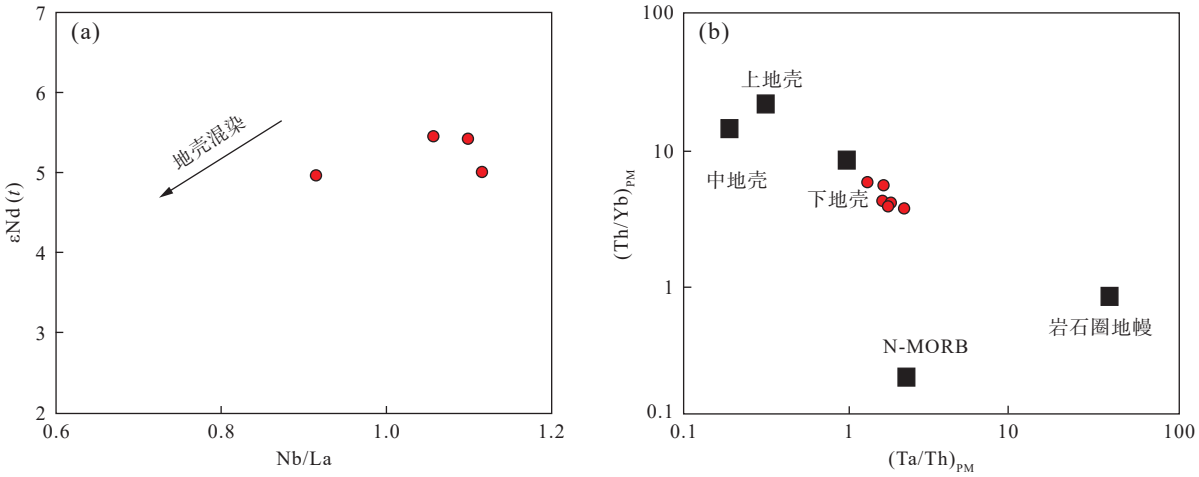
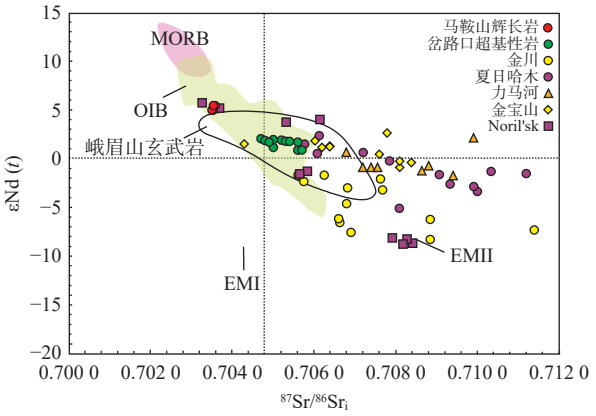


图8 马鞍山辉长岩 $\varepsilon_{Nd}(t)$-Nb/La 图解(a)和$(Th/Yb)_{PM}$-$(Ta/Th)_{PM}$ 图解(b)(据 Neal et al., 2002)

Fig. 8 (a) Maanshan gabbro $\varepsilon_{Nd}(t)$-Nb/La diagram and (b) $(Th/Yb)_{PM}$-$(Ta/Th)_{PM}$ diagram

马鞍山辉长岩经历了地壳混染。

马鞍山辉长岩具有低的$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$值(0.703 50～0.703 58)与高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$值(+5.0～+5.5),指示其源区为亏损地幔。与国内外铜镍钴矿床相比,其同位素组成显著偏向低 Sr、高 Nd,仅与 Noril'sk 矿床部分样品相似,显示更亏损的幔源属性(图 9)。辉长岩的 CaO/Al_2O_3 值为 0.65～0.80(平均为 0.75),La/Ta 值为 10.33～14.61(平均为 13.05),明显不同于大陆岩石圈地幔(CaO/Al_2O_3<0.7, La/Ta>25),而与软流圈地幔类似(CaO/Al_2O_3>0.7, La/Ta=8～15; Turner et al., 1995; Lassiter et al., 1997)。在 Nb/La-La/Yb 图解中(图 10a),样品也主要落入软流圈地幔范围。马鞍山辉长岩的稀土与微量元素配分模式与洋岛玄武岩(OIB)相似(图 6a、图 6b),在 TiO_2/Yb-Nb/Yb 判别图解中与区内其他基性–超基性岩样品一同落在 OIB 范围内(图 10b)。上述地球化学特征表明,该辉长岩源于具有 OIB 特征的亏损软流圈地幔。



不同地区基性–超基性岩 Sr-Nd 同位素数据引自 Zhou et al.(2008)、Krivolutskaya et al.(2012)、Tang et al.(2022)、Xue et al.(2023)、Cheng et al.(2024)

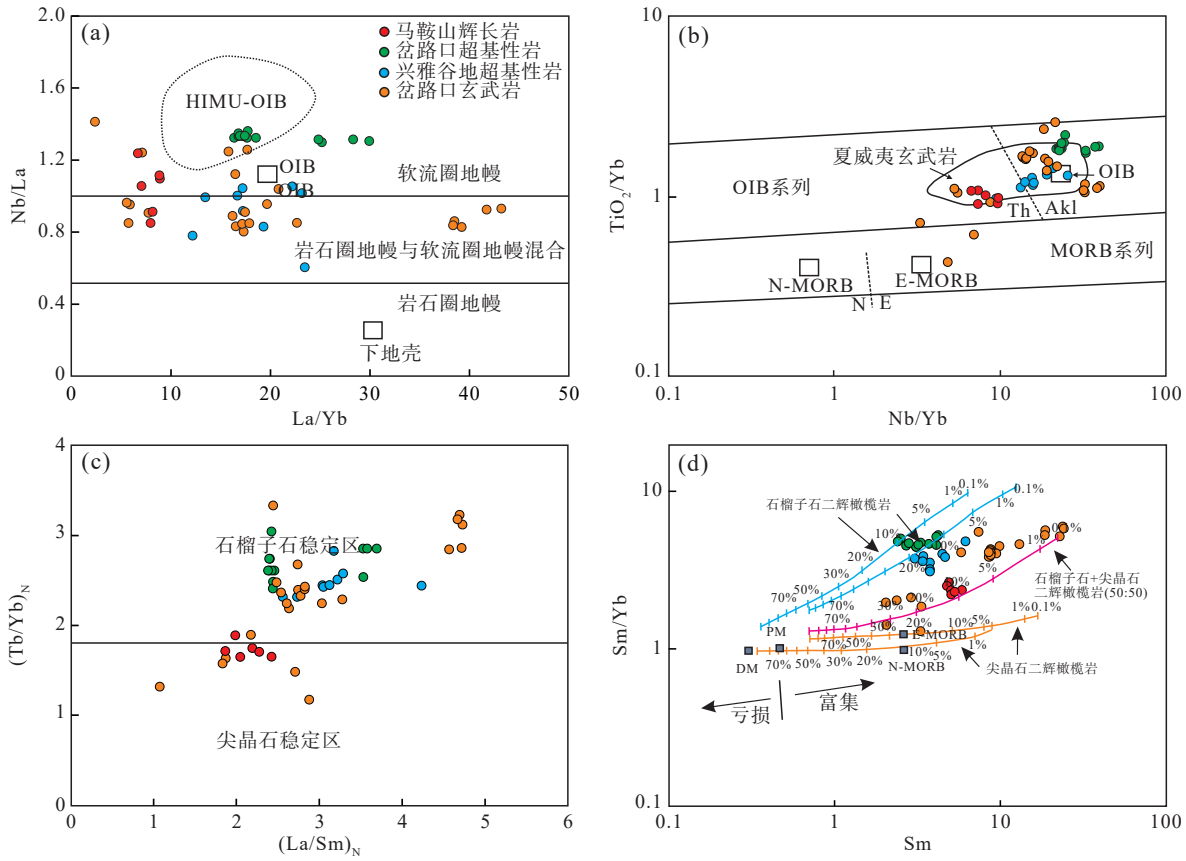
图9 马鞍山辉长岩$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$-$\varepsilon_{Nd}(t)$图解

Fig. 9 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ vs. $\varepsilon_{Nd}(t)$ isotopic correlation diagram of Maanshan gabbro

在地幔部分熔融与岩浆演化过程中,Zn/Fe 值常被用作判别源区属性(Le Roux et al., 2010)。马鞍山辉长岩的 10 000×Zn/Fe 值为 8.46～9.53,与地幔橄榄岩部分熔融产生的岩浆相似(通常不超过 12.5, Le Roux et al., 2010; Bowman et al., 2023)。辉长岩 Dy/Yb 值为 2.16～2.43,介于尖晶石二辉橄榄岩地幔(<1.5)与石榴子石二辉橄榄岩地幔(>2.5)之间(Duggen et al., 2005)。$(Sm/Yb)_N$-$(La/Sm)_N$ 及 Sm/Yb-Sm 图解(图 10c、图 10d)指示辉长岩源区存在近乎等比例的石榴子石与尖晶石矿物组合。考虑到尖晶石相与石榴子石相稳定域之间的相变带,大致对应地下约 70～80 km 的深度(Hess, 1992)。因此,马鞍山辉长岩可能是较深地幔源区(约 75 km)部分熔融的产物,熔融程度约为 10%,而区域内其他基性–超基性岩则是不同深度地幔橄榄岩经不同程度部分熔融的产物(图 10d)。需要注意的是,研究获得的数据仅能约束Ⅰ号岩体的源区性质,马鞍山岩体整体的源区特征仍有待后续补充Ⅱ号岩体的研究工作加以完善。

5.2 构造背景

西昆仑地区三叠纪处于古特提斯洋俯冲消减至碰撞闭合的构造阶段(张传林等, 2019)。岔路口地区三叠纪基性–超基性岩的构造环境一直存有争议,主要观点有陆间裂谷–初始洋盆环境、俯冲环境和地幔



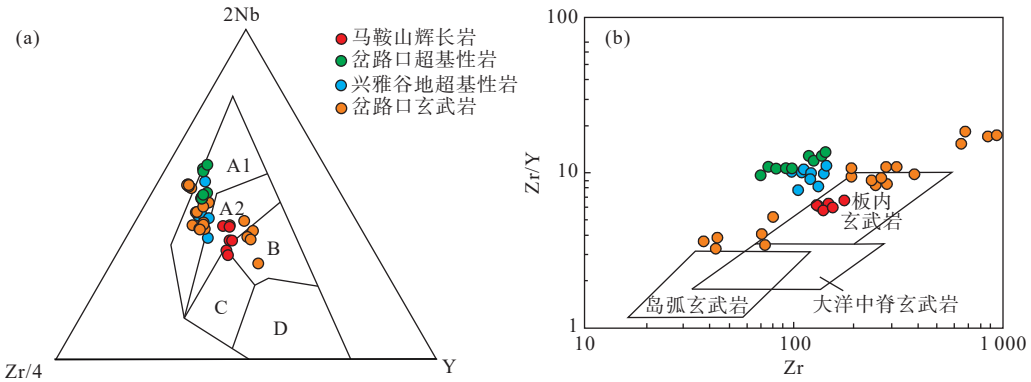
a. Nb/La-La/Yb 图解据 Pearce(2008)；b. TiO_2-Nb/Yb 图解据 Pearce(2008)；c. $(Tb/Yb)_N$-$(La/Sm)_N$ 图解据 Wang et al.(2002)；d. Sm/Yb-Sm 图解据王涛等(2012)；岔路口基性–超基性岩数据引自田江涛等(2021)、杨万志等(2021)、任文林等(2023)、Cheng et al.(2024)

图10　马鞍山辉长岩源区判别图解

Fig. 10　Discrimination diagrams for the source region of the Maanshan gabbro

柱环境等(魏永峰等, 2016; 杨万志等, 2021; Cheng et al., 2024)。马鞍山辉长岩的 Zr/Sm 值(26.85～29.78)与板内环境的 Zr/Sm 值(>25)相似(Rudnick et al., 2003)，相关构造环境判别图(图 11)亦指示马鞍山辉长岩及区域基性–超基性岩形成于板内环境。此外，辉长岩的 δNb 值为 0.13～0.14(δNb>0)，表明其与地幔柱物质上涌有关(Fitton et al., 1997)。源自核–幔边界的地幔柱物质通常具有高地幔潜温(>1 450 ℃; Herzberg et al., 2007)。Herzberg et al.(2015)基于橄榄岩部分熔融实验，通过模拟约束原生岩浆组成，拟合出地幔潜能温度的计算公式(Tp=1 025+28.6MgO–0.084MgO^2)。笔者采用该方法计算得到马鞍山辉长岩($Mg^{\#}$=46～51)的原始岩浆地幔潜能温度(Tp)为 1 574～1 616 ℃，与同期岔路口超基性岩(1 522～1 580 ℃; 杨万志等, 2021; Cheng et al., 2024)的地幔潜能温度相似，与峨眉山地幔柱成因的大火成岩省基性–超基性岩地幔潜能温度具有可比性(1 400～1 630 ℃; 李永生, 2012)，指示辉长岩原始岩浆的异常高温可能是地幔柱导致。

岔路口地区高 Ti 玄武岩和低 Ti 玄武岩在空间上呈有规律的分布(田江涛等, 2021)，与峨眉山大火成岩省相似，但岩浆活动规模有限，更接近地幔柱成因的洋岛–海山。在 Nb/Yb-TiO_2/Yb 关系图中(图 10b)，马鞍山辉长岩及区域基性–超基性岩与夏威夷洋岛玄武岩范围一致。区内超基性熔岩以玻基纯橄岩、玻基辉橄岩和苦橄质熔岩为主，呈夹层状分布于玄武岩、玄武质火山碎屑岩及硅质岩中，构成一套深海相火山–沉积序列(杨万志等, 2021; Cheng et al., 2024)，符合洋岛–海山的岩石组合特征。区内蛇绿岩残片由超基性岩、基性岩及硅质岩构成(魏永峰等, 2016)，在区域构造演化过程中，此类蛇绿岩残片常与洋岛–海山残片共同产出(袁四化等, 2020)。结合喀拉昆仑地块被认为是一个形成于晚三叠世至早侏罗世的增生楔(Mat-



A1.板内碱性玄武岩；A2.板内碱性玄武岩与拉斑玄武岩；B.地幔柱洋中脊玄武岩；C.板内拉斑玄武岩与火山弧玄武岩；D.火山弧玄武岩与正常洋中脊玄武岩大洋中脊玄武岩；岔路口基性–超基性岩数据引自田江涛等(2021)、杨万志等(2021)、任文林等(2023)、Cheng et al.(2024)

图11 马鞍山辉长岩 2×Nb-Zr/4-Y(a)(据 Meschede, 1986)和 Zr/Y-Zr(b)(据 Pearce and Norry, 1979)图解

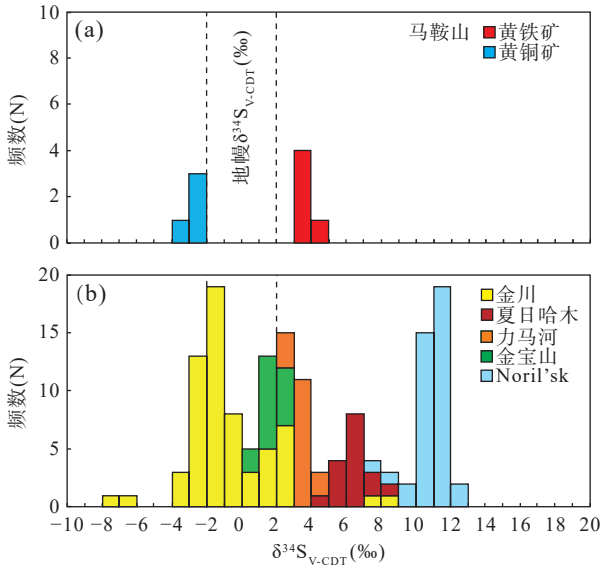
Fig. 11 (a) Diagrams of 2×Nb-Zr/4-Y and (b) Zr/Y-Zr for the Maanshan gabbro

tern et al., 2000; Xiao et al., 2005)，岔路口地区可能原为古特提斯洋盆中与地幔柱相关的洋岛，该洋岛伴随古特提斯洋壳向北俯冲，与甜水海地体拼贴，最终成为喀拉昆仑增生楔的一部分。

5.3 硫饱和机制

在铜镍钴硫化物矿床的形成过程中，镁铁质岩浆能否达到硫饱和并成矿，关键在于是否有壳源硫的加入(Maier et al., 1999)。岩浆在上升侵位时混染大陆地壳物质，是获取壳源硫的主要途径。全球许多世界级矿床(如 Noril'sk、金川、夏日哈木)的硫同位素研究均显示其硫源具有地壳特征，证实了地壳物质混染对成矿的关键控制作用(Malitch et al., 2014; Xue et al., 2023)。除地壳混染外，岩浆混合、结晶分异等机制也可能共同促成硫饱和(Naldrett, 2011; Ripley et al., 2013; 姚卓森, 2025)。

硫化物熔离时，Cu 优先于 Zr 进入硫化物相，导致岩石 Cu/Zr 值降低(Lightfoot et al., 2005)。Ni、Co 兼具亲铜与亲石性，硫化物熔离时首先显示亲铜性进入硫化物(Green, 1994)。马鞍山辉长岩的 Cu/Zr 比值(0.3～1.4，平均 0.6)低于区域玄武岩平均值(0.8；田江涛等, 2021)，MgO 与 Co、Ni 呈正相关性(图 7g、图 7i)，表明发生了硫化物熔离。马鞍山辉长岩中浸染状黄铁矿和黄铜矿的 $\delta^{34}S$ 值分别为+3.27‰～+4.23‰和−3.59‰～−2.06‰，与国内外铜镍钴硫化物矿床范围一致(图 12)，且偏离幔源硫($\delta^{34}S$=0±2‰；Ripley et al., 2007；段俊等, 2025)，表明成岩过程中经历了地壳硫的混染。此外，辉长岩具有较高的$(Th/Yb)_{PM}$值和介



典型铜镍硫化物矿床硫同位素数据引自马言胜等(2009)、Malitch et al.(2014)、Xue et al.(2023)、Tang et al.(2024)

图12 马鞍山辉长岩及相关岩体 $\delta^{34}S$ 分布直方图

Fig. 12 Histogram of $\delta^{34}S$ Distribution in the Maanshan gabbro

于地幔与地壳之间的 Ce/Pb、Nb/Ta 值等特征，同样指示岩浆在上侵过程中受到了显著的地壳物质混染，明确揭示了地壳硫的混染是导致岩浆硫饱和并引发硫化物熔离的主要原因。辉长岩较低的 $Mg^{\#}$值以及 Cr、Ni 含量表明原始岩浆经历了以橄榄石和辉石为主的分离结晶，通过降低熔体中硫的溶解度，进一步促进了硫化物的熔离过程(Ripley et al., 2013)。

5.4 成矿潜力分析

近年来，青海东昆仑已探明夏日哈木、石头坑德等大型–超大型铜镍矿床(董俊等, 2017; 张照伟等,

2024)。新疆东昆仑也相继报道了一系列铜镍矿化点(如贝壳滩、夏尔干、秦布拉克等)(陈建中等, 2024)。西昆仑地处秦祁昆造山系西段, 与东昆仑同属特提斯构造域演化产物, 区域上发育多期次岩浆活动, 并在岔路口地区呈现出 Cu、Ni、Co 等关键成矿元素的化探异常(李惠等, 2020), 显示该区具有良好的铜镍钴矿找矿前景。

含铜镍钴矿的岩体多与高镁拉斑玄武质岩浆及苦橄质岩浆有关(Naldrett, 2004; 钱兵等, 2017)。马鞍山岩体形成与地幔柱密切相关, 其母岩浆为拉斑玄武质岩浆, 与力马河等峨眉山大火成岩省含矿岩体具有相似的岩浆属性(尤敏鑫等, 2017)。不同于大火成岩省, 板内洋岛通常不利于形成大型岩浆铜镍硫化物矿床, 主要原因是大洋地壳硫丰度低于大陆地壳(黎彤, 1984), 岩浆难以通过同化混染获得足够的硫。但理论上若岩浆在上升过程中混染了洋底富硫沉积物或早期洋壳物质, 那么原始岩浆也可能达到硫饱和。

本次研究在镜下未观察到含镍硫化物, 但据最新勘探结果显示辉长岩相中存在少量原生含镍磁黄铁矿和紫硫镍矿, 这可能是比重差异导致岩体“顶部富铜, 底部富镍”, 因而出露岩体少见含镍硫化物。以往物探数据显示该区存在隐伏高磁地质体(秦学文等, 2023), 辉长岩与围岩外接触带发育的镍华亦暗示深部可能存在未探明的镍矿体。马鞍山辉长岩的 M/F 值(0.94～1.15)与国内外基性–超基性岩铜镍钴矿床(0.40～14.01; 刘嘉等, 2019)相近, 但未处于最有利的区间(2.00～6.50)。

综合现有研究成果, 认为马鞍山岩体深部具有一定的找矿前景, 但由于当前工作尚无法确认超基性岩与成矿的关系, 其成矿潜力有待后续对超基性岩的系统研究进一步验证。

6　结论

(1)马鞍山辉长岩具有洋岛玄武岩(OIB)的性质, 其原始岩浆起源于亏损软流圈地幔, 并经历了一定程度的地壳混染和分离结晶。

(2)马鞍山辉长岩具有较高的地幔潜能温度范围(1 574～1 616 ℃), 形成于三叠纪板内伸展环境, 成因类似于地幔柱作用形成的洋岛玄武岩。

(3)地壳混染是马鞍山辉长岩发生硫饱和和硫化物熔离的主要原因, 辉长岩和围岩外接触带发育的镍华及辉长岩较低的 M/F 值(0.94～1.15)指示马鞍山岩体深部具有一定的找矿前景, 但具体成矿潜力还需进一步勘查。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

陈建中, 夏昭德, 王驰源, 等. 阿尔金-东昆仑造山带铜镍矿成矿地质条件与找矿前景[J]. 新疆地质, 2024, 42(2): 238−243.

CHEN Jianzhong, XIA Zhaode, WANG Chiyuan, et al. Metallogenic geological conditions and prospecting potential of Cu-Ni deposits in the Altun-East Kunlun orogenic belt[J]. Xinjiang Geology, 2024, 42(2): 238−243.

陈实, 李平, 李大海, 等. 新疆北部造山带岩浆铜镍硫化物矿床地球物理勘查现状与展望[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 118−130.

CHEN Shi, LI Ping, LI Dahai, et al. Current Status and Prospects of Geophysical Exploration of Magmatic Cu-Ni Sulfide Deposits in Northern Xinjiang Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 118−130.

董俊, 黄华良, 尹建华, 等. 东昆仑石头坑德镁铁-超镁铁质岩地质特征及成矿条件分析[J]. 西北地质, 2017, 50(2): 49−60.

DONG Jun, HUANG Hualiang, YIN Jianhua, et al. Geological Characteristics of the Shitoukengde Mafic-Ultramafic Rocks in East Kunlun and Related Metallogenic Conditions[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(2): 49−60.

段俊, TeukuAmrul Mahdi, 王宁, 等. 金川铜镍矿床多硫同位素和铁同位素特征及成因意义[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 56−68.

DUAN Jun, Teuku Amrul Mahdi, WANG Ning, et al. Characteristics and Genetic Implications of Multiple Sulfur and Iron Isotopes in the Jinchuan Cu-Ni Deposit[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 56−68.

高晓峰, 隋清霖, 尤敏鑫, 等. 造山带岩浆铜镍硫化物矿床深部动力学机制探讨[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 206−220.

GAO Xiaofeng, SUI Qinglin, YOU Minxin, et al. Study on Dynamic Mechanism of Magmatic Copper-Nickel Sulfide Deposits in Orogenic Belts[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 206−220.

高一杰, 辜平阳, 张江伟, 等. 中国西北地区近十年中高级变质作用研究进展[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 19−41.

GAO Yijie, GU Pingyang, ZHANG Jiangwei, et al. Progresses in the Study of Metamorphism of Northwest China in the Past Decade[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 19−41.

胡彦强. 金川Ⅳ号含矿岩体岩浆演化与成矿作用 [D]. 西安: 长安大学, 2012.

HU Yanqiang. Magmatic Evolution and Mineralization of the Segment IV Ore-bearing Rock Body of Jinchuan Nickel–Copper Sulfide Deposit[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.

侯增谦, 陈骏, 翟明国. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J]. 科学通报, 2020, 65(33): 3651−3652.

HOU Zengqian, CHEN Jun, ZHAI Mingguo. Current status and frontiers of research on critical mineral resources[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3651−3652.

李惠, 杨万志, 周军. 新疆西昆仑岔路口地区铜镍找矿前景的地球化学分析[J]. 新疆有色金属, 2020, 43(2): 84−89.

LI Hui, YANG Wanzhi, ZHOU Jun. Geochemical analysis of copper-nickel prospecting potential in the Chalukou area, West Kunlun, Xinjiang[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2020, 43(2): 84−89.

黎彤. 大洋地壳和大陆地壳的元素丰度[J]. 大地构造与成矿学, 1984, (1): 19−27.

LI Tong. Abundance of chemical elements in oceanic and continental crust[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1984, (1): 19−27.

李永生. 峨眉山大火成岩省岩浆作用过程的定量模拟 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2012.

LI Yongsheng. Quantitative modeling of the Emeishan large igneous province magmatism processes[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.

蔺新望, 张亚峰, 陈国超, 等. 阿尔泰造山带南缘岩浆混合作用: 阿克布拉克岩体岩石学、地球化学和年代学证据[J]. 地球科学, 2023, 48(10): 3597−3612.

LIN Xinwang, ZHANG Yafeng, CHEN Guochao, et al. LA-ICP-MS U-Pb Geochronology, Geochemistry and Petrography of Akebulake Pluton in Southern Altay Orogenic Belt: An Example for Magma Mixing[J]. Earth Science, 2023, 48(10): 3597−3612.

刘嘉, 蔡鹏捷. 基性-超基性岩铜镍矿与铬铁矿含矿性判别研究[J]. 地质找矿论丛, 2019, 34(4): 499−509.

LIU Jia, CAI Pengjie. Discriminatoin of specific attributive of Cu-Ni ore or Cr ore to basic-ultrabasic rocks[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources, 2019, 34(4): 499−509.

马言胜, 陶琰, 朱飞霖, 等. 金宝山铂-钯矿和力马河镍矿的硫同位素组成特征及地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(2): 123−127.

MA Yansheng, TAO Yan, ZHU Feilin, et al. The Sulfur Isotopic Characteristics and Geological Significance of Jinbaoshan Pt-Pd Deposit and Limahe Nickel Deposit[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(2): 123−127.

潘裕生. 西昆仑山构造特征与演化[J]. 地质科学, 1990, (3): 224−232.

PAN Yusheng. Tectonic characteristics and evolution of the West Kunlun Mountains[J]. Chinese Journal of Geology, 1990, (3): 224−232.

钱兵, 张照伟, 刘会文, 等. 柴达木西北缘古生代镁铁-超镁铁质岩体 Cu-Ni 成矿条件与找矿潜力分析[J]. 西北地质, 2017, 50(1): 35−49.

QIAN Bing, ZHANG Zhaowei, LIU Huiwen, et al. Analysis on the Prospecting Potentiality and Cu-Ni Metallogenic Conditions of the Paleozoic Mafic-Ultramafic Intrusions in the Northwestern Margin of Qaidam Basin[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(1): 35−49.

秦学文, 范磊善, 颉勇, 等. 西昆仑岔路口地区马鞍山基性-超基性岩体地质特征及找矿意义[J]. 新疆地质, 2023, 41(1): 9−13.

QIN Xuewen, FAN Leishan, XIE Yong, et al. Geological characteristics and prospecting significance of the Ma'anshan basic-ultrabasic rock mass in the Chalukou area, West Kunlun[J]. Xinjiang Geology, 2023, 41(1): 9−13.

任文林, 张博文, 苏春媚, 等. 西昆仑—喀喇昆仑甜水海地区克勒青河组“双峰式”火山岩年代学、地球化学特征及构造意义[J]. 地质科学, 2023, 58(3): 864−889.

REN Wenlin, ZHANG Bowen, SU Chunmei, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of the bimodal volcanic rocks of Keleqinghe Formation in the Tianshuihai area of West Kunlun-Karakoram[J]. Chinese Journal of Geology, 2023, 58(3): 864−889.

田江涛, 唐毅, 赵同阳, 等. 喀喇昆仑岔路口地区玄武岩地幔柱信息[J]. 新疆地质, 2021, 39(2): 198−209.

TIAN Jiangtao, TANG Yi, ZHAO Tongyang, et al. Mantle plume information from basalts in the Chalukou area of the Karakoram[J]. Xinjiang Geology, 2021, 39(2): 198−209.

汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物 (含铂) 矿床成矿模式及地质对比 [M]. 北京: 地质出版社, 1995: 209.

王涛, 肖渊甫, 邓江红, 等. 香格里拉洛吉晚二叠系玄武岩的元素地球化学及其成因研究[J]. 矿物岩石, 2012, 32(4): 41−51.

WANG Tao, XIAO Yuanfu, DENG Jianghong, et al. Elemental Geochemistry and Petrogenesis of Permian Basalts in Luoji, Shangri-La[J]. Mineralogy and Petrology, 2012, 32(4): 41−51.

魏永峰, 赵志强, 林美英, 等. 西昆仑团结峰地区 E-MORB 残片的发现、地球化学特征及构造意义[J]. 新疆地质, 2016, 34(3): 312−316.

WEI Yongfeng, ZHAO Zhiqiang, LIN Meiying, et al. Discovery, geochemical characteristics and tectonic significance of E-MORB fragments in the Tuanjiefeng area of West Kunlun[J]. Xinjiang Geology, 2016, 34(3): 312−316.

新疆维吾尔自治区地质调查院. 1∶10000 新疆和田县马鞍山铜镍矿普查项目实际材料 [R].新疆维吾尔自治区地质调查院, 2022.

杨万志, 田江涛, 郭秀玮. 喀喇昆仑岔路口地区麦美奇质岩石的发现及其构造意义: 岩石学、矿物学和地球化学证据[J]. 世界地质, 2021, 40(3): 511−524.

YANG Wanzhi, TIAN Jiangtao, GUO Xiuwei. Identification of meimechitic rocks from Chalukou area in Karakoram and its tectonic significance: petrological, mineralogical and geochemical evidence[J]. Global Geology, 2021, 40(3): 511−524.

姚卓森. 岩浆铜镍矿床中硫化物的垂向物理运移机制[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 1−22.

YAO Zhuosen. Vertical Transfer of Sulfide in the Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 1−22.

尤敏鑫, 张照伟, 刘建民, 等. 攀西地区镁铁-超镁铁岩地球化学与岩浆型 Cu-Ni-(PGE) 硫化物矿床成矿[J]. 西北地质, 2017, 50(3): 146−161.

YOU Minxin, ZHANG Zhaowei, LIU Jianmin, et al. Geochemistry of Mafic-ultramafic Intrusions and Cu-Ni- (PGE) Sulfide Deposits in Panxi Region, China[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(3): 146−161.

袁四化, 潘桂棠, 任飞. 洋岛-海山研究进展及其对重建洋板块

的意义[J]. 地球科学, 2020, 45(8): 2826−2845.

YUAN Sihua, PAN Guitang, REN Fei. Review on geological research of oceanic island-seamount and its significance for reconstruction of ocean plate[J]. Earth Science, 2020, 45(8): 2826−2845.

张传林, 马华东, 朱炳玉, 等. 西昆仑—喀喇昆仑造山带构造演化及其成矿效应[J]. 地质论评, 2019, 65(5): 1077−1102.

ZHANG Chuanlin, MA Huadong, ZHU Bingyu, et al. Tectonic evolution and metallogenic effects of the West Kunlun-Karakoram orogenic belt[J]. Geological Review, 2019, 65(5): 1077−1102.

张飞飞. 夏日哈木镍钴硫化物矿床多期次成岩成矿作用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.

ZHANG Feifei. Study on the multi-phase diagenetic mineralization of Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023.

张翔, 黄增保, 陈世强, 等. 甘肃省基性–超基性岩时空分布与铜镍硫化物矿资源潜力[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 69−86.

ZHANG Xiang, HUANG Zengbao, CHEN Shiqiang, et al. Temporal and Spatial Distribution of Basic-Ultrabasic Rocks and the Resource Potential of Cu-Ni Sulfide Deposit in Gansu Province, China[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 69−86.

张愿宁, 徐刚, 王富贵, 等. 新疆东天山黄山地区岩浆铜镍矿床特征对比及找矿启示[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 102−117.

ZHANG Yuanning, XU Gang, WANG Fugui, et al. Comparison of Magmatic Cu-Ni Deposits in Huangshan Area, East Tianshan and Its Implications for Prospecting[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 102−117.

张照伟, 钱兵, 王亚磊, 等. 东昆仑造山带岩浆镍钴硫化物矿床形成构造背景探讨[J]. 中国地质, 2024, 51(2): 371−384.

ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, WANG Yalei, et al. Tectonic settings discussion of magmatic nickel−cobalt sulfide deposits in the eastern Kunlun orogenic belt[J]. Geology in China, 2024, 51(2): 371−384.

周军, 任燕. 新疆西昆仑岔路口—甜水海地区铅锌资源地球化学定量预测[J]. 物探与化探, 2014, 38(2): 220−226.

ZHOU Jun, REN Yan. Quantitative geochemical prediction of lead-zinc resources in the Chalukou-Tianshuihai area, West Kunlun, Xinjiang[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(2): 220−226.

Arndt N. Komatiites, kimberlites, and boninites[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2003, 108(B6): ECV 5−1−ECV 5−11.

Bowman E E, Ducea M N. Pyroxenite melting at subduction zones[J]. Geology, 2023, 51(4): 383−386.

Cheng Z G, Zhang Z C, Lang M D, et al. Geochemical evidence of plume sources for high-MgO lavas in the western Kunlun orogenic belt[J]. Journal of Petrology, 2024, 65(5): 042.

Duggen S, Hoernle K, van den Bogaard P, et al. Post-collisional transition from subduction- to intraplate-type magmatism in the westernmost Mediterranean: Evidence for continental-edge delamination of subcontinental lithosphere[J]. Journal of Petrology, 2005, 46(6): 1155−1201.

Fitton J G, Saunders A D, Norry M J, et al. Thermal and chemical structure of the Iceland plume[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 153(3-4): 197−208.

Frey F A, Green D H, Roy S D. Integrated models of basalt petrogenesis: A study of quartz tholeiites to olivine melilitites from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data[J]. Journal of Petrology, 1978, 19(3): 463−513.

Green T H. Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis—Sedona 16 years later[J]. Chemical Geology, 1994, 117(1-4): 1−36.

Herzberg C, Asimow P D. PRIMELT3 MEGA. XLSM software for primary magma calculation: Peridotite primary magma MgO contents from the liquidus to the solidus[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2015, 16(2): 563−578.

Herzberg C, Asimow P D, Arndt N, et al. Temperatures in ambient mantle and plumes: Constraints from basalts, picrites, and komatiites[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2007, 8(2): Q02006.

Hess P C. Phase equilibria constraints on the origin of ocean floor basalts[M]. Morgan J P, Blackman D K, Sinton J M. Mantle Flow and Melt Generation at Mid-ocean Ridges. Washington, D. C. : American Geophysical Union, 1992: 67−102.

Hofmann A W. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism[J]. Nature, 1997, 385(6613): 219−229.

Irving T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1971, 8(5): 523−548.

Krivolutskaya N A, Sobolev A V, Mikhailov V N, et al. Parental melt of the Nadezhdinsky Formation: Geochemistry, petrology and connection with Cu-Ni deposits (Noril'sk area, Russia)[J]. Chemical Geology, 2012, 302−303: 87−105.

Kuno H. Differentiation of basalt magmas[A]. In: Hess H H, Poldervaart A (Eds.). Basalts: The Poldervaart Treatise on Rocks of Basaltic Composition[M]. New York: Interscience, 1968: 623–688.

Lassiter J C, DePaolo D J. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotopic constraints[J]. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 1997, 100: 335−355.

Le Roux V, Lee C T A, Turner S J. Zn/Fe systematics in mafic and ultramafic systems: Implications for detecting major element heterogeneities in the Earth's mantle[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74(9): 2779−2796.

Li X H, Li Z X, Sinclair J A, et al. Revisiting the "Yanbian Terrane": Implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China[J]. Precambrian Research, 2006, 151(1-2): 14−30.

Lightfoot P C and Keays R R. Siderophile and chalcophile metal variations in flood basalts from the Siberian Trap, Noril'sk Region: Implications for the origin of the Ni-Cu-PGE sulfide ores[J]. Economic Geology, 2005, 100: 439−462.

Lv L S, Li H B, Yang X N, et al. Neoproterozoic magmatic Ni–Cu–(PGE) sulfide deposits related to the assembly and breakup of the Rodinia supercontinent in China: An overview[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 99: 282−302.

Liu Y G, Li W Y, Jia Q Z, et al. The Dynamic Sulfide Saturation Process and a Possible Slab Break-off Model for the Giant Xiarihamu Magmatic Nickel Ore Deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Economic Geology, 2018, 113(6): 1383−1417.

Magson J, Roelofse F, Bybee G, et al. The Merensky-Bastard interval at Hackney, eastern Bushveld Complex: results of a combined Sr-Nd-isotopic investigation[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2024, 179(7): 1−22.

Maier W D, Barnes S J. The origin of Cu sulfide deposits in the Curaca Valley, Bahia, Brazil: Evidence from Cu, Ni, Se, and platinum-group element concentrations[J]. Economic Geology, 1999, 94(2): 165−183.

Malitch K N, Latypov R M, Badanina I Y, et al. Insights into ore genesis of Ni-Cu-PGE sulfide deposits of the Noril'sk Province (Russia): Evidence from copper and sulfur isotopes[J]. Lithos, 2014, 204: 172−187.

Mattern F, Schneider W. Suturing of the Proto- and Paleo-Tethys oceans in the western Kunlun (Xinjiang, China)[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18: 637−650.

Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. Chemical Geology, 1986, 56(3): 207−218.

Naldrett A J. Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry, and exploration[M]. Berlin: Springer, 2004: 1−17.

Naldrett A J. Fundamentals of magmatic sulfide deposits[J]. Reviews in Economic Geology, 2011, 17: 1−50.

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.

Pearce J A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. Lithos, 2008, 100(1-4): 14−48.

Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1979, 69(1): 33−47.

Polat A, Appel P W U, Fryer B, et al. Trace element systematics of the Neoarchean Fiskenæsset anorthosite complex and associated meta-volcanic rocks, SW Greenland: Evidence for a magmatic arc origin[J]. Precambrian Research, 2009, 175(1-4): 87−115.

Polat A, Fryer B J, Samson I M, et al. Geochemistry of ultramafic rocks and hornblendite veins in the Fiskenæsset layered anorthosite complex, SW Greenland: Evidence for hydrous upper mantle in the Archean[J]. Precambrian Research, 2012, 214-215: 124−153.

Ripley E M, Li C. Applications of stable and radiogenic isotopes to magmatic Cu-Ni-PGE deposits: Examples and cautions[J]. Earth Science Frontiers-English Edition, 2007, 14(5): 124−132.

Ripley E M, Li C. Sulfide saturation in mafic magmas: Is external sulfur required for magmatic Ni–Cu–(PGE) ore genesis?[J]. Economic Geology, 2013, 108(1): 45−58.

Rudnick R, Gao S. The role of lower crustal recycling in continent formation[C]. 13th Annual V. M. Goldschmidt Conference, 2003: A403−A403.

Tang Q Y, Li C S, Bao Y W, et al. Origin of highly variable and unusually low δ^7Li in mineral separates from ultramafic intrusive rocks in a convergent tectonic setting in the Tibetan plateau[J]. Chemical Geology, 2022, 611: 121133.

Tang Q Y, Bao J, Zhang Y, et al. Copper isotope fractionation during magmatic evolution in a convergent tectonic setting: Constraints from sulfide Cu-S isotopes and whole-rock PGE of the Xiarihamu Ni-Cu sulfide deposit[J]. Chemical Geology, 2024, 668: 122348.

Tao Y, Li C S, Hu R Z, et al. Petrogenesis of the Pt-Pd mineralized Jinbaoshan ultramafic intrusion in the Permian Emeishan Large Igneous Province, SW China[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2007, 153(3): 321−337.

Turner S, Hawkesworth C. The nature of the sub-continental mantle: Constraints from the major-element composition of continental flood basalts[J]. Chemical Geology, 1995, 120(3): 295−314.

Venier M, Ziberna L, Princivalle F, et al. Trace elements in chromian spinels from four Siberian kimberlites[J]. Minerals, 2022, 12(11): 1439.

Wang K, Plank T, Walker J D, et al. A mantle melting profile across the Basin and Range, SW USA[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2002, 107(B1): 1−21.

Wei B, Wang C Y, Li C S, et al. Origin of PGE-Depleted Ni-Cu Sulfide Mineralization in the Triassic Hongqiling No. 7 Orthopyroxenite Intrusion, Central Asian Orogenic Belt, Northeastern China[J]. Economic Geology, 2013, 108(8): 1813−1831.

Wilson M. Igneous petrogenesis: a global tectonic approach[M]. Vol. 5. Netherlands: Springer, 1989.

Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Arc-ophiolite obduction in the western Kunlun range (China): Implications for the Palaeozoic evolution of central Asia[J]. Journal of the Geological Society, 2002, 159(5): 517−528.

Xiao W J, Windley B F, Liu D Y, et al. Accretionary tectonics of the Western Kunlun orogen, China: A Paleozoic-Early Mesozoic, long-lived active continental margin with implications for the growth of Southern Eurasia[J]. The Journal of Geology, 2005, 113(6): 687−705.

Xue S C, Wang Q F, Wang Y L, et al. The roles of various types of crustal contamination in the genesis of the Jinchuan magmatic Ni-Cu-PGE deposit: New mineralogical and C-S-Sr-Nd isotope constraints[J]. Economic Geology, 2023, 118(8): 1795−1812.

Zhang Y, Niu Y L, Hu Y, et al. The syncollisional granitoid magmatism and continental crust growth in the West Kunlun Orogen, China – Evidence from geochronology and geochemistry of the Arkarz pluton[J]. Lithos, 2016, 245: 191−204.

Zhang Z C, Mao J W, Saunders A D, et al. Petrogenetic modeling of three mafic–ultramafic layered intrusions in the Emeishan large igneous province, SW China, based on isotopic and bulk chemical constraints[J]. Lithos, 2009, 113(3): 369−392.

Zhao J H, Zhou M F. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle[J]. Precambrian Research, 2007, 152: 27−47.

Zhou M F, Arndt N T, Malpas J, et al. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China[J]. Lithos, 2008, 103(3): 352−3.