

doi: 10.12097/gbc.2024.02.021

北祁连造山带西段红川铜镍硫化物矿床的岩浆演化过程 ——来自岩石地球化学和锆石 Hf 同位素的约束

李林娜^{1,2}, 焦建刚^{1,3,4*}, 沈清杰^{5,6}, 赵国斌², 徐铭池¹, 郭钧桦¹, 王佳新¹
LI Linna^{1,2}, JIAO Jiangang^{1,3,4*}, SHEN Qingjie^{5,6}, ZHAO Guobin², XU Mingchi¹,
GUO Junhua¹, WANG Jiaxin¹

1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;
 2. 中国地质调查局西安地质中心, 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054;
 3. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;
 4. 西安市关键金属成矿与高效利用重点实验室, 陕西 西安 710054;
 5. 甘肃省地质矿产勘查开发局第四地质矿产勘查院, 甘肃 酒泉 735000;
 6. 甘肃省矿产资源勘查重点实验室, 甘肃 酒泉 735000
1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
 2. Key Laboratory for the study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
 3. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
 4. Xi'an Key Laboratory for Mineralization and Efficient Utilization of Critical Metals, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
 5. Fourth Institute of Geological and Mineral Exploration of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources Jiuquan 735000, Gansu, China;
 6. Key Laboratory of Mineral Resources Exploration, Jiuquan 735000, Gansu, China

摘要:【研究目的】北祁连造山带内的红川铜镍矿床是近年找矿的重要发现。该矿床的赋矿岩体形成时代、岩石成因和岩浆源区性质不明,制约了进一步了解其成矿过程。【研究方法】因此,对其开展岩石学、岩石地球化学、锆石 U-Pb 同位素年代学和 Hf 同位素地球化学研究。【研究结果】红川铜镍矿床中赋矿岩体主要由强蛇纹石化橄榄岩和黑云角闪石岩组成,主要含矿岩性是强蛇纹石化橄榄岩。岩石地球化学特征显示,红川岩体主量元素具有低 SiO_2 (39.13%~46.35%), 高 MgO (13.69%~27.47%), 高 $\text{Mg}^\#$ 值 (68.28~79.91), 稀土元素配分曲线显示平坦型特征, 亏损微量元素 Nb、P 和 Ti。对红川 IV 号赋矿岩体中的含斜长石橄榄岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年, 获得锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 486.9 ± 5.9 Ma, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -0.19~7.12 之间。【结论】结合岩石地球化学数据和区域地质背景对比分析, 该岩体形成于岛弧环境, 岩浆源区为经历了俯冲板片流体交代作用的亏损地幔, 岩浆侵位过程中经历了小于 10% 的地下壳物质混染。

关键词: 年代学; 岩石成因; 铜镍硫化物矿床; 镁铁—超镁铁质岩体; 北祁连造山带

创新点: 综合运用岩石地球化学和锆石 Hf 同位素手段约束红川铜镍硫化物矿床的岩浆演化过程, 实现了多维度数据的相互印证和补充, 更全面、准确地揭示研究区岩浆演化的复杂过程。

收稿日期: 2024-02-28; 修订日期: 2024-05-18

资助项目: 国家自然科学基金项目《甘肃金川岩浆铜镍(铂)硫化物矿床“硫化物矿浆”搬运富集机制》(批准号: 92162213)、中央引导地方科技发展资金项目:《甘肃西部铜镍硫化物矿床成矿作用与找矿预测研究》(编号: 24ZYQF001)与中国地质调查局项目《祁连-秦岭成矿带战略性矿产调查》(编号: DD20240115)

作者简介: 李林娜(1998-), 女, 在读博士生, 地质学专业。E-mail: linna@chd.edu.cn

* 通信作者: 焦建刚(1976-), 男, 教授, 从事矿床学研究与教学。E-mail: jiangang@chd.edu.cn

中图分类号: P618.14; P618.631 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)05-0885-17

Li L N, Jiao J G, Shen Q J, Zhao G B, Xu M C, Guo J H, Wang J X. Magmatic evolution of the Hongchuan Cu-Ni sulfide deposit, western North Qilian Orogenic Belt: Insights from whole-rock geochemistry and zircon Hf isotopes. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(5): 885–901

Abstract: [Objective] The recent discovery of the Hongchuan Cu–Ni deposit in the North Qilian Orogenic Belt represents a significant breakthrough in mineral exploration. Uncertainties in the formation age, petrogenesis, and magmatic source of the ore-bearing intrusions hinder a comprehensive understanding of the deposit’s mineralization mechanisms. [Methods] Therefore, this study integrates petrological, whole-rock geochemical, zircon U–Pb geochronological, and Hf isotopic analyses to characterize these intrusions. [Results] The ore-bearing rock in the Hongchuan Cu–Ni deposit predominantly comprises strongly serpentinized peridotite and biotite amphibolite, and the main ore-bearing lithology is strongly serpentinized peridotite. Geochemical analyses reveal features, including low SiO_2 (39.13%–46.35%) and high MgO (13.69%–27.47%) contents, high $\text{Mg}^\#$ values (68.28–79.91). The distribution curve of rare earth elements shows flat characteristics, and trace elements Nb, P, and Ti are deficient. Zircon U–Pb dating, conducted via LA–ICP–MS on zircons from the plagioclase-bearing peridotite, yielded a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 486.9 ± 5.9 Ma, with zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ranging from -0.19 to 7.12 . [Conclusions] Integrating geological data with regional geological context suggests a genesis within an island arc environment. The magma source is proposed to have originated from a depleted mantle that was influenced by fluid alteration and subduction processes, with less than 10% contamination of lower crustal materials during magma emplacement.

Key words: chronology; petrogenesis; Cu–Ni sulfide deposits; Hongchuan mafic-ultramafic intrusions; North Qilian Orogenic Belt

Highlights: By comprehensively applying the two methods of rock geochemistry and zircon Hf isotope to constrain the magmatic evolution process of the Hongchuan copper-nickel sulfide deposit, the mutual verification and supplementation of multi-dimensional data have been achieved, which can more comprehensively and accurately reveal the complex process of magmatic evolution.

中国的岩浆铜镍硫化物矿床按成矿背景大致可分为大陆裂谷环境和造山带伸展环境(李文渊等, 2022)。中国板内环境成矿条件有限, 至今仅发现华北克拉通西南缘的金川及扬子克拉通西缘的一系列中小型铜镍矿(薛胜超等, 2024), 而造山带面积广阔, 近年来, 随着找矿勘查工作的不断深入, 造山带内陆续发现了多个大型—超大型铜镍硫化物矿床(王润民等, 1987; Mao et al., 2008; 秦克章等, 2012; Song et al., 2016; Xue et al., 2016)。

祁连造山带是一个包括蛇绿岩套、高压变质岩带、岛弧火山岩、深成花岗岩类侵入岩、复理石、磨拉石和上覆盖层的造山缝合带(段俊等, 2015)。构造上一般将其划分为 3 个构造单元: 北祁连构造带(河西走廊和走廊南山)、中祁连地块(托莱山)和南祁连构造带(陈宣华等, 2019)。北祁连造山带西段经历了加里东、印支、喜马拉雅 3 期构造变形影响, 岩浆活动强烈, 出露的岩浆岩主要为镁铁—超镁铁质杂岩体(葛肖虹和刘俊来, 1999; 沙鑫等, 2016; 王玉玺等, 2024)。野外地质调查表明, 在北祁连西段熬油沟、二只哈拉、塔里干沟、卡瓦、双龙等地区有出露良好的镁铁质—超镁铁质岩, 主要岩石类型

为蛇纹石化辉橄岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩等, 均以构造侵位的形式混杂在太古宇—古元古界北大河岩群和中元古界朱龙关岩群中(刘懿馨等, 2018)。在北祁连西段的镜铁山地区, 有学者还发现了与中元古界条带状铁建造有关的破碎带蚀变岩型铜矿, 如桦树沟铜矿和柳沟峡铜矿(杨合群等, 2009)。综上所述, 北祁连造山带西段具有良好的找矿远景。

2022 年, 北祁连造山带西段发现了红川铜镍硫化物矿床, 经探槽揭露和钻孔验证, 圈定镍矿体 2 条, 伴生有 Cu 和 Co 元素, Ni 平均品位 0.392%~0.413%, 局部 Cu 品位 0.12%~0.26%, 伴生 Co 品位 0.016%~0.025%。初步估算镍推断资源量 3×10^4 t, 达中型规模(龚振中等, 2023)。自红川铜镍硫化物矿床发现以来, 得到了勘查单位的重视, 对其主要开展了矿产勘查工作。相关工作表明, 红川研究区矿化超镁铁质岩体具有高磁、高重、中高极化和中、低电阻的地球物理特征, CSAMT 显示异常埋深体 800 m 以上, 规模可达 $600 \text{ m} \times 200 \text{ m}$, 而且地表海绵陨铁状和浸染状矿化多见于超基性岩体顶部和边缘, 据此认为其中下部有巨大的找矿潜力。同时, 还

有学者为研究红川铜镍硫化物矿床的大地构造背景,对红川铜镍矿体进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试,认为其侵位年龄为 $585.1 \pm 4.3 \sim 590.9 \pm 2.1$ Ma,与金川铜镍矿成矿年龄(827 Ma)相近(龚振中等, 2024)。但由于 2 个矿床形成年龄误差相差较大,该研究结果存在争议。此外,红川铜镍硫化物矿床的各类研究性工作仍较薄弱,制约了进一步的找矿思路和找矿方向。因此,本文对红川镁铁—超镁铁质赋矿岩体开展系统的岩石学、地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究,分析红川铜镍硫化物矿床成因,以期深入认识其成矿地质背景并对该区的铜镍找矿提供思路。

1 区域地质概况

红川铜镍硫化物矿床大地构造位置属于北祁连造山带西段,北祁连造山带南界与中祁连地块相邻,北西以阿尔金左行走滑断裂为界与敦煌地块相接,北东与龙首山和阿拉善地块相邻(葛肖虹和刘俊来, 1999; 李文渊, 2004; 樊新祥等, 2020)(图 1)。在区域上,祁连造山带和阿尔金断裂带是青藏高原东北缘的重要组成部分,地质历史时期经历了多期次板块俯冲碰撞和造山作用,特别是印度板块与欧亚板块的碰撞及推挤作用,使各地体之间发生剧烈的相对运动和构造变动变形(沙鑫等, 2016)。

北祁连地层分区出露的地层有太古宇—古元古界北大河岩群、长城系桦树沟组、奥陶系阴沟群、妖魔山组、南石门子组和扣门子组;走廊地层分区出露的地层有志留系肮脏沟组、泉脑沟山组和旱峡组,泥盆系老君山组,石炭系羊虎沟组,二叠系大黄沟组和红泉组,侏罗系中间沟组、新河组和博罗组及白垩系下沟组。其中,太古宇—古元古界北大河岩群岩石类型主要有二云石英片岩、含石墨二云石英片岩、黑云母变粒岩、角闪岩、角闪斜长变粒岩等,研究区超镁铁质岩多侵位于该岩群的二云石英片岩中;下奥陶统阴沟群形成于洋盆环境的典型蛇绿岩建造,是北祁连热水喷流型矿床的主要赋矿地层之一;中—上奥陶统扣门子组为形成于陆缘岛弧环境的浅变质中基性、中酸性火山岩建造,其基性火山岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $445 \sim 428$ Ma(夏林圻等, 1996),LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 443 Ma(余吉远等, 2010),说明其形成于中—晚奥陶世。该套地层中产有红沟、蛟龙掌等块状硫化物矿床,为北祁连

重要的赋矿层位(李世金, 2011)。

北祁连地区铜多金属矿床成矿作用与北祁连地区构造演化密切相关。区内成矿作用可分为:早寒武世(约 522 Ma),双向俯冲阶段的洋中脊构造环境(如阴凹槽铜锌矿床早期)及弧后拉张脊构造环境(如小沙龙直沟铜矿床),控制了塞浦路斯型 VMS 矿床的形成;晚寒武世—晚奥陶世末期(482~442 Ma),双向俯冲阶段的活动大陆边缘构造环境,控制了黑矿型 VMS 矿床(如尕斯库勒铜铅锌多金属矿床)、斑岩型矿床(如松树南沟金矿床、浪力克铜矿床)和热液脉型矿床(如辽班台铅锌矿床、郭米寺铜铅锌多金属矿床的形成);三叠纪(约 212 Ma)内陆造山阶段,阿拉善地块不断向中祁连地块俯冲,岩石圈加厚,发生大规模岩石圈拆沉作用,幔源物质上涌,控制了岩浆型矿床(如红柳槽金铂矿床)的形成(丛智超, 2017)。

2 岩体地质

红川铜镍硫化物矿床地处北祁连西段,地理坐标为东经 $97^{\circ}05'12'' \sim 97^{\circ}09'13''$ 、北纬 $39^{\circ}45'29'' \sim 39^{\circ}47'49''$ 。该矿区出露 4 处超镁铁质岩体,规模均较小,多呈岩墙、岩枝状,呈北西西向展布,侵入太古宇—古元古界北大河岩群中(图 2)。目前在Ⅲ号、Ⅳ号岩体中发现了镍矿体。

Ⅲ号岩体呈岩墙状,出露于研究区中部,长约 660 m,平均宽约 60 m,面积 0.062 km^2 ,3000 m 标高以上倾向北,倾角 $55^{\circ} \sim 65^{\circ}$,3000 m 标高以下岩体产状接近直立或倾向南,整体呈东陡西缓,东部深达 600 m 以上,西部延伸仅 200 m,呈楔形向下尖灭,Ⅲ号岩体大部分构成矿体。Ⅳ号超镁铁质岩体呈岩墙状产出研究区中南部,岩体南界与奥陶系扣门子组呈断层接触,出露长约 820 m,平均宽约 62 m,最大宽 120 m,面积约为 0.064 km^2 ,北西西向展布,倾向北,倾角 $45^{\circ} \sim 50^{\circ}$,岩体整体呈不规则透镜状,东部呈分叉尖灭。红川含矿超镁铁质岩体主要由含矿的强蛇纹石化橄榄岩和赋矿围岩黑云角闪石岩组成,二者为相变接触。

黑云角闪石岩呈灰黑色,半自形粒状结构,块状构造(图 3-a)。主要矿物为角闪石(约 75%),次要矿物为黑云母(约 15%)、辉石(约 5%)等。角闪石呈绿褐色,自形—半自形粒状;黑云母呈片状,多发生强烈绢云母化;辉石蚀变强烈,呈半自形柱状、他形粒状,粒径与角闪石相当;含极少量金属矿物磁铁矿和

黄铜矿(图 3-b, c)。块状构造(图 3-d)。原岩矿物强烈蚀变, 据推测, 原岩主要由橄榄石(约 80%)组成, 次为辉石(约 15%)

强蛇纹石化橄榄岩呈墨绿色, 半自形粒状结构,

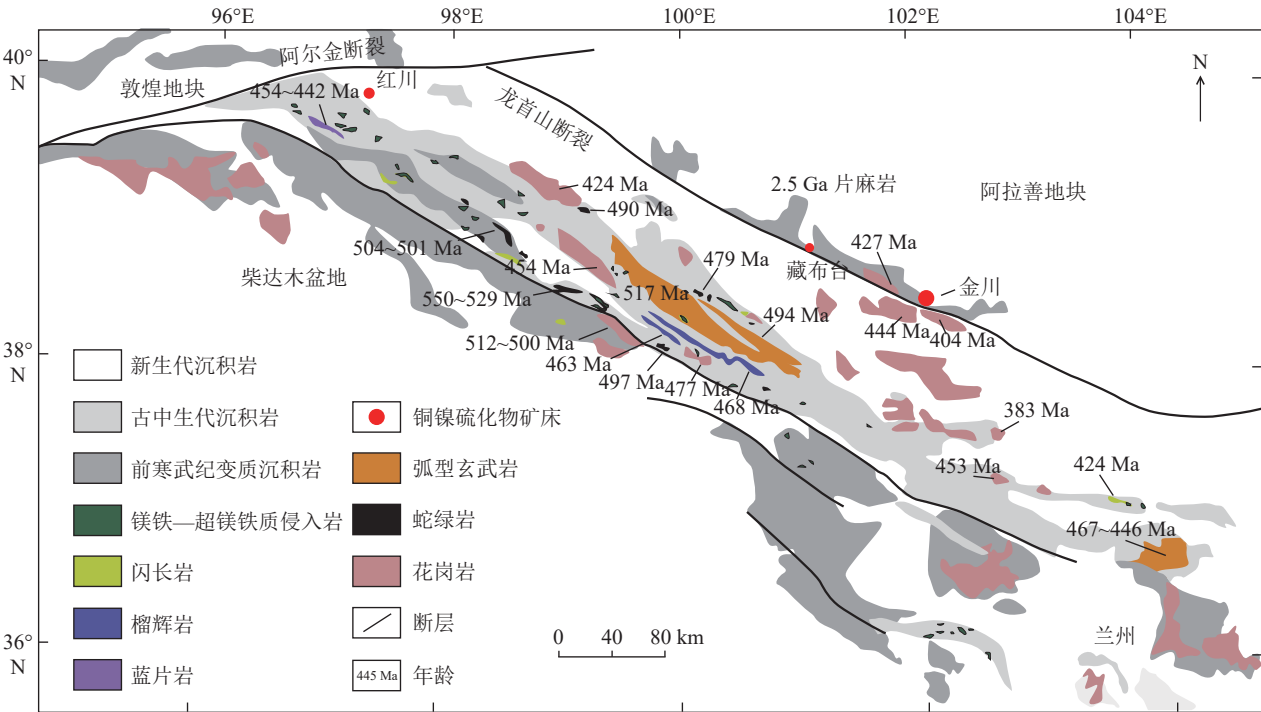


图 1 红川地区大地构造背景示意图(据 Duan et al., 2015 修改)

Fig. 1 Sketch map showing the tectonic background of the Hongchuan area

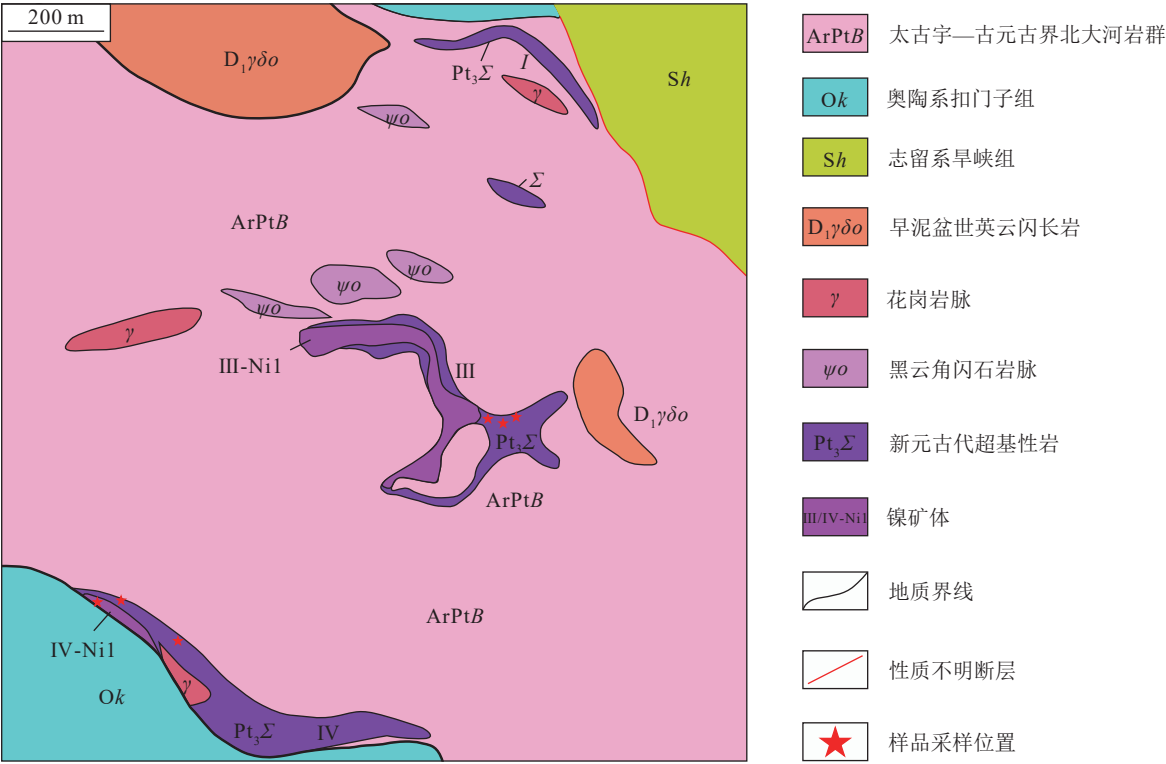


图 2 红川铜镍硫化物矿床地质图(据龚振中等, 2024 修改)

Fig. 2 Geological map of the Hongchuan Cu-Ni sulfide deposit

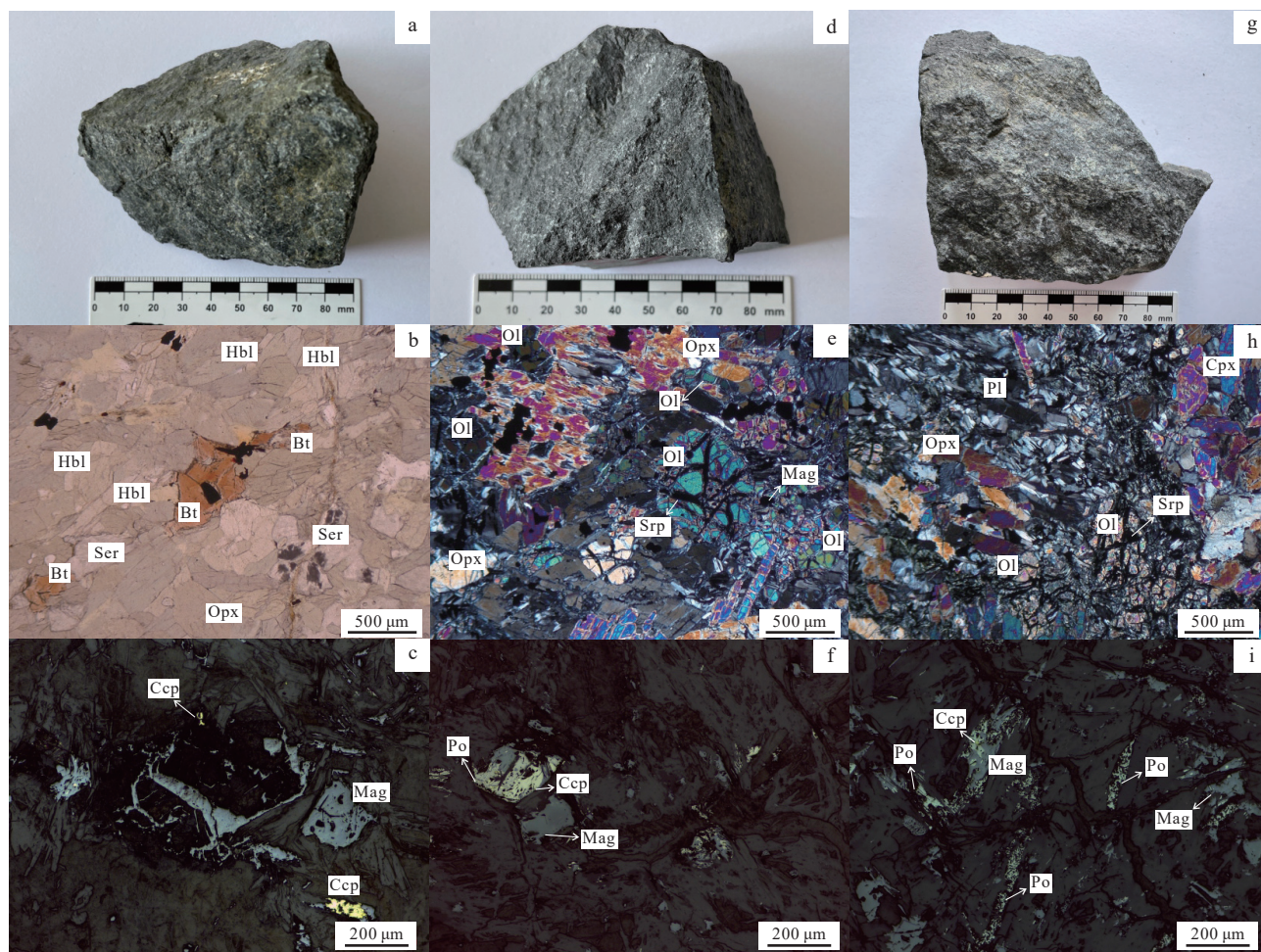


图 3 红川岩体岩石标本及镜下照片

Fig. 3 Specimen and microscopic photos of the Hongchuan intrusions

a—黑云角闪岩手标本; b—透射单偏光, 自形一半自形角闪石, 黑云母绢云母化; c—反射单偏光, 极少量磁铁矿和黄铜矿硫化物组合; d—蛇纹石化橄榄岩手标本; e—透射正交偏光, 斜方辉石蚀变, 橄榄石蛇纹石化, 局部析出磁铁矿; f—反射单偏光-磁铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿硫化物组合; g—含斜长石橄榄岩手标本; h—透射正交偏光, 橄榄石蛇纹石化, 少量斜长石、斜方辉石和单斜辉石; i—反射单偏光-少量金属矿物磁铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿。Hbl—角闪石; Bt—黑云母; Ser—绢云母化; Ol—橄榄石; Srp—蛇纹石化; Opx—斜方辉石; Cpx—单斜辉石; Pl—斜长石; Mag—磁铁矿; Po—磁黄铁矿; Ccp—黄铜矿

等, 蚀变矿物主要为蛇纹石, 次为绿泥石(图 3-e), 金属矿物主要为磁黄铁矿、磁铁矿和黄铜矿(图 3-f)。岩体局部还见少量与强蛇纹石化橄榄岩呈相变过渡的含斜长石橄榄岩, 该岩石整体呈灰黑色, 细粒结构, 块状构造(图 3-g), 主要矿物由橄榄石组成, 含少量斜长石、单斜辉石和斜方辉石(图 3-h), 见磁黄铁矿、磁铁矿和黄铜矿硫化物共生组合(图 3-i)。

3 样品采集与分析测试方法

本次采集红川Ⅲ号超镁铁质岩体中黑云角闪岩 3 件, Ⅳ号超基性岩体中强蛇纹石化橄榄岩、含斜长石橄榄岩和黑云角闪岩各 1 件, 用于相关测试

分析。具体采样位置如图 2 所示。

3.1 锆石 U-Pb 测年

红川超镁铁质岩体样品锆石 U-Pb 定年的粉碎、选样、制靶和照相在北京锆年领航科技有限公司完成, 测试在长安大学成矿作用及其动力学实验室完成。样品粉碎采用常规方法进行粉碎, 并用常规浮选方法进行锆石分选, 再用双目镜挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒作为测定对象。将锆石颗粒粘在双面胶上, 经环氧树脂固定-环氧树脂固化-表面抛光工序后, 进行透射光、反射光和阴极发光(CL)照相, 并选取分析点位, 测点位置避开裂隙、包裹体和重结晶部位。实验使用的 ICP-MS 为美国

Agilent 公司 7700X 型四极杆等离子体质谱仪; 激光剥蚀系统为美国 PhotoMachines 公司的 Analyte Excite 193 nm 气态准分子激光剥蚀系统, 激光束斑直径为 35 μm 和 25 μm , 频率 5 Hz, 能量密度 5.9 J/cm² 的条件下, 测试时采用 NIST610 + 2 个 91500 + Plešovice + 样品点 + NIST610 + 2 个 91500 + Plešovice 测试流程。锆石 U-Pb 年龄采用 91500 为外标, 锆石微量元素含量采用 NIST610 为外标, ⁹¹Zr 为内标元素进行定量计算。对分析数据的离线处理采用 ICPMSDatacal 程序 (Liu et al., 2010), 包括对空白及锆石样品的信号选择、仪器灵敏度漂移矫正、锆石元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值、年龄计算等; 锆石年龄加权平均值计算及谐和图绘制采用 Isoplot3.7 (Ludwig, 2003) 完成。

3.2 锆石 Hf 同位素组成分析

在完成前述锆石 U-Pb 年龄测试的基础上, 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岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成。测试采用的仪器为 Geolas Pro 型激光剥蚀系统及 Neptune Plus 型多接收等离子质谱仪 (LA-MC-ICP-MS)。

测试流程简述如下: 使用氦作为剥蚀物质载气, 使用激光剥蚀束斑直径为 44 μm , 激光剥蚀频率为 8 Hz。分析过程中 GJ-1 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 测试加权平均值为 0.282007 $\pm$ 0.000025 (2 σ), 计算初始 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值时采用的 Lu 衰变常数为 1.867 $\times$ 10⁻¹¹ (Scherer et al., 2001)。锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值基于 U-Pb 年龄获得, 计算时采用的球粒陨石 Hf 同位素 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.0366, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282785 (Bouvier et al., 2008)。计算锆石 Hf 单阶段模式年龄 (t_{DM1}) 时采用亏损地幔的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 现在值为 0.282325, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Lu 值为 0.0384 (Griffin et al., 2000)。计算锆石 Hf 二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 时采用平均地壳 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值, 为 0.015 (Griffin et al., 2000)。

3.3 全岩主量、稀土和微量元素分析

岩石样品的主量、微量和稀土元素在长安大学教育部西部工程与矿产资源实验室分析完成。全岩主量元素采用 X 荧光光谱 (XRF) 玻璃熔片法进行分析, 使用仪器为日本岛津扫描 LAB CENTER XRF-1800 型 X 射线荧光光谱仪, 分析精度为 2%~5%。全岩微量和稀土元素采用混合酸溶法溶样分析, 采用美国 Agilent 公司生产的 Agilent 7700E 型四极杆电

感耦合等离子体质谱仪 (ICPMS) 完成, 微量和稀土元素分析的精度和准确度大多优于 10%。主量元素测试流程为: 挑选新鲜的具有代表性的样品, 将其破碎磨成不超过 200 目的粉末样品放入烘箱以计算其烧失量; 然后将样品和高纯四硼酸锂等实验试剂混合均匀后在熔炉中加热到 1100 $^{\circ}\text{C}$ 熔制成玻璃片并编号; 随后使用 1800 型 X 荧光光谱仪测定样品主量成分。

稀土和微量元素测试流程为: 将用酸 (硝酸和氢氟酸) 溶解后的样品移至容量瓶中用 1% 的 HNO₃ 稀释摇匀定容, 使用仪器对其进行元素含量分析。全岩主量、微量和稀土元素的制样及测试过程中每 10 个样品带 1 个平行样, 以检测测试结果的稳定性和可靠性。

4 分析结果

4.1 岩体锆石 U-Pb 年龄

本次对来自红川 IV 号超镁铁质岩体中的含斜长石橄榄岩 (23HC-IV-2) 样品进行了锆石 U-Pb 定年, 相对应的锆石 U-Pb 年龄数据结果可见表 1。该样品中的锆石形态多样, 颗粒大小不一, 多数为他形粒状晶体, 少数为半自形—自形的透明柱状, 颗粒长 30~120 μm , 宽 20~80 μm , 长短轴比为 1 : 1~3.7 : 1 (图 4)。部分锆石内部呈无分带、弱分带或扇形分带特征, 推测这些锆石可能遭受了不同程度的变质改造作用或热液蚀变 (吴元保和郑永飞, 2004; 李长民, 2009)。部分锆石晶体在阴极发光 (CL) 图像上显示明显的振荡环带, 具岩浆锆石特征。本次选择其中的 18 粒锆石进行测年 (表 1)。

锆石的 U 含量为 52.13 $\times$ 10⁻⁶~1996.45 $\times$ 10⁻⁶, Th 含量为 42.69 $\times$ 10⁻⁶~979.37 $\times$ 10⁻⁶, Th/U 值为 0.34~0.82, 高于变质成因锆石的 Th/U 值 (通常小于 0.1), 而与岩浆锆石一致 (大于 0.1), 由此认为测试锆石属于岩浆锆石 (Claesson et al., 2000; Hoskin et al., 2000)。LA-ICP-MS 测试分析结果显示, 10 粒锆石的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 489~484 Ma, 年龄加权平均值为 486.9 $\pm$ 5.9 Ma (MSWD=0.037; 图 5)。2 粒年轻锆石的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分别为 445 Ma 和 440 Ma, 其中一颗测试误差较大, 另一颗锆石有环带白边, 可能与后期区域变质事件有关。年老锆石年龄中, 2 粒锆石的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄分别为 2000 Ma 和 2557 Ma, 3 粒锆石的年龄为 727~720 Ma, 年龄加权平均值为 724 $\pm$ 20

表 1 红川含斜长石橄榄岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 定年分析结果

Table 1 Analytical results of zircon LA-ICP-MS U-Th-Pb ages of Hongchuan plagioclase-bearing peridotites

分析点	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
23HC-IV-2	含斜长石橄榄岩														
23HC-IV-2-1	200	269	0.74	0.0582	0.0075	0.5424	0.0511	0.0714	0.0062	1999	283	440	34	445	37
23HC-IV-2-2	932	1996	0.47	0.0641	0.0021	0.6971	0.0207	0.0785	0.0015	746	69	537	12	487	9
23HC-IV-2-3	43	52	0.82	0.1699	0.0058	11.6391	0.3764	0.4981	0.0128	2557	57	2576	30	2606	55
23HC-IV-2-4	68	172	0.40	0.0557	0.0028	0.6064	0.0327	0.0785	0.0015	439	111	481	21	487	9
23HC-IV-2-5	979	1995	0.49	0.0660	0.0018	1.0902	0.0349	0.1193	0.0026	806	59	749	17	727	15
23HC-IV-2-6	95	194	0.49	0.0634	0.0037	0.6853	0.0375	0.0785	0.0020	720	125	530	23	487	12
23HC-IV-2-7	88	233	0.37	0.0630	0.0027	0.6771	0.0298	0.0779	0.0015	707	93	525	18	484	9
23HC-IV-2-8	247	357	0.69	0.0717	0.0048	1.1457	0.0579	0.1186	0.0030	976	136	775	27	722	17
23HC-IV-2-9	59	146	0.41	0.0654	0.0059	0.7226	0.0567	0.0818	0.0028	787	193	552	33	507	16
23HC-IV-2-10	94	199	0.47	0.0601	0.0033	0.6485	0.0341	0.0787	0.0017	609	117	508	21	488	10
23HC-IV-2-11	47	122	0.38	0.1230	0.0041	6.4079	0.2398	0.3756	0.0083	2000	60	2033	33	2056	39
23HC-IV-2-12	75	194	0.38	0.0609	0.0035	0.6622	0.0354	0.0786	0.0012	635	122	516	22	488	7
23HC-IV-2-13	500	1485	0.34	0.0577	0.0025	0.6303	0.0261	0.0788	0.0019	520	96	496	16	489	11
23HC-IV-2-14	394	969	0.41	0.0550	0.0030	0.5438	0.0329	0.0707	0.0017	413	124	441	22	440	10
23HC-IV-2-15	148	419	0.35	0.0615	0.0036	1.0135	0.0669	0.1182	0.0043	657	125	711	34	720	25
23HC-IV-2-16	204	271	0.75	0.0565	0.0029	0.6192	0.0334	0.0784	0.0019	472	118	489	21	486	11
23HC-IV-2-17	81	187	0.43	0.0563	0.0035	0.6041	0.0362	0.0780	0.0016	465	137	480	23	484	9
23HC-IV-2-18	73	175	0.42	0.0587	0.0035	0.6473	0.0406	0.0788	0.0017	554	131	507	25	489	10

Ma, 1 粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 507 Ma, 可能为捕获锆石。

4.2 锆石 Hf 同位素组成

在锆石 U-Pb 测年的基础上, 本次对红川含斜长石橄榄岩(23HC-IV-2)开展了锆石原位 Hf 同位素组成测试, 分析数据见表 2。结果显示, 所有测点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000404~0.002103, 平均值为 0.001000, 表明锆石在形成后基本没有或具有极低的放射成因 Hf 的积累(吴福元等, 2007), 测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 即为形成时体系的 Hf 同位素组成。由于样品锆石中 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值较低(-0.99~-0.94), 锆石 Lu-Hf 同位素二阶段模式年龄可以代表其源区物质从地幔中分离的时限(Vervoort and Patchett, 1996)。8 粒锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值变化较小(0.282470~0.282673), 表明岩浆源区性质相对单一, 相应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于-0.2~7.1 之间, 平均为 3.4, Hf 同位素二阶段模式年龄(t_{DM2})介于 1421~955 Ma 之间。

4.3 岩石地球化学特征

4.3.1 主量元素

所有样品均显示相对较高的烧失量(LOI=

1.66%~8.32%; 表 3), 说明岩浆在侵位之后遭受了不同程度的低温热液蚀变。红川黑云角闪石岩的 SiO_2 含量为 43.84%~46.35%, 平均为 45.41%; TiO_2 含量较低, 为 0.43%~0.69%, 平均为 0.60%; MgO 含量高, 为 13.69%~15.98%, 平均为 14.97%; Na_2O 含量为 1.16%~1.59%, 平均为 1.34%; K_2O 含量为 0.16%~0.86%, 平均为 0.51%; Al_2O_3 含量为 10.92%~12.21%, 平均为 11.64%; CaO 含量为 9.73%~11.60%, 平均为 10.37%; TFe_2O_3 含量为 11.48%~13.39%, 平均为 12.35%; P_2O_5 含量为 0.02%~0.08%, 平均为 0.06%; MnO 含量 0.15%~0.19%, 平均为 0.17%; $\text{Mg}^\#$ 值为 68.28~72.63; m/f 值为 2.12~2.62。

蛇纹石化橄榄岩和含斜长石橄榄岩的 SiO_2 含量分别为 39.13% 和 45.62%; TiO_2 含量较低, 分别为 0.26% 和 0.31%; MgO 含量高, 分别为 27.47% 和 15.27%; Na_2O 含量分别为 0.30% 和 2.09%; K_2O 含量分别为 0.04% 和 0.17%; Al_2O_3 含量分别为 6.27% 和 10.37%; CaO 含量分别为 4.18% 和 12.19%; TFe_2O_3 含量分别为 13.68% 和 11.69%; P_2O_5 含量分别为 0.03%

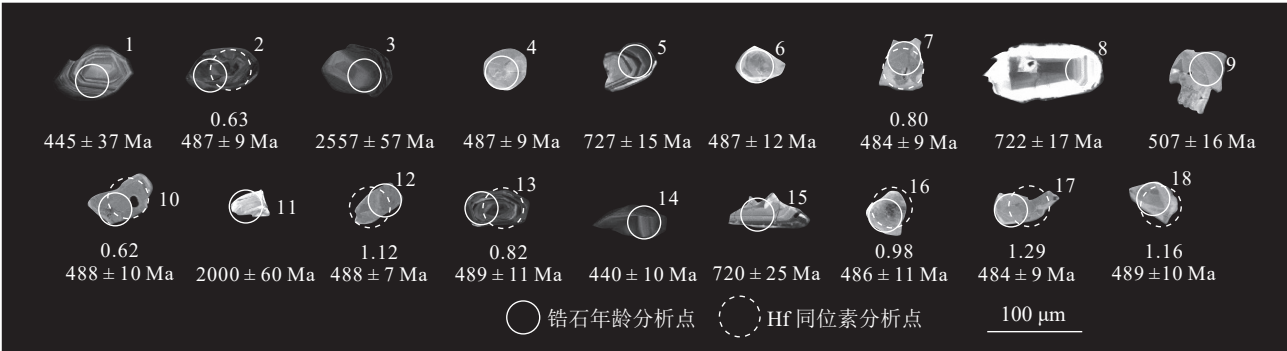


图 4 红川含斜长石橄榄岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 4 CL images of zircon from Hongchuan plagioclase-bearing peridotites

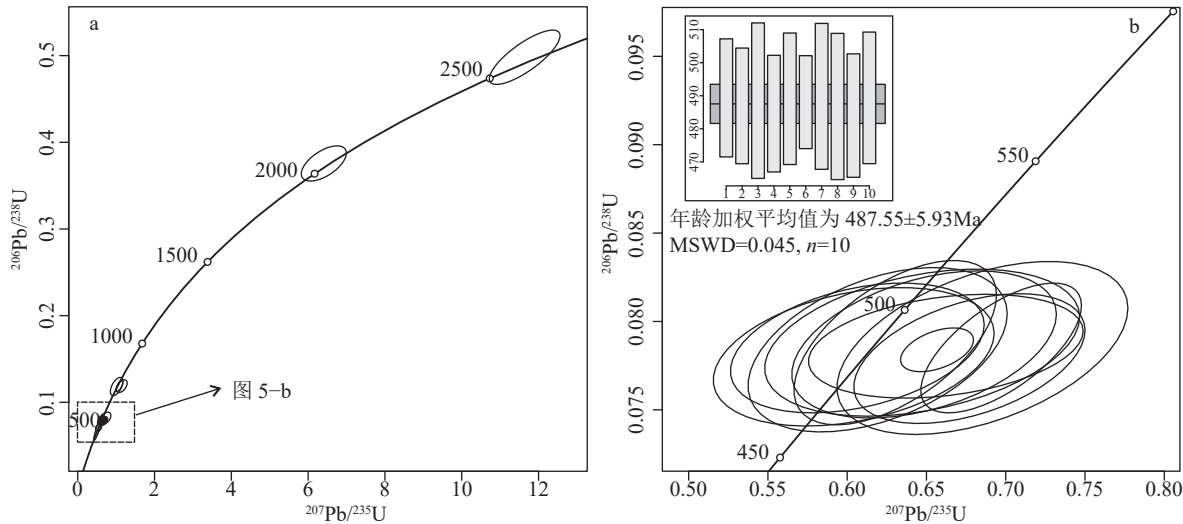


图 5 红川含斜长石橄榄岩锆石 U-Pb 定年结果

Fig. 5 Zircon U-Pb dating results of Hongchuan plagioclase-bearing peridotites

表 2 红川含斜长石橄榄岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 2 Analytical results of zircon Hf isotope of the Hongchuan plagioclase-bearing peridotites

分析点	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	年龄/Ma	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
23HC-IV-2-2	0.108178	0.002103	0.282573	0.000018	487	-6.97	3.00	939	1185	-0.94
23HC-IV-2-7	0.017197	0.000528	0.282661	0.000023	484	-3.87	6.54	783	967	-0.98
23HC-IV-2-10	0.013316	0.000404	0.282673	0.000018	488	-3.42	7.12	764	934	-0.99
23HC-IV-2-12	0.020694	0.000653	0.282542	0.000032	488	-8.05	2.40	946	1223	-0.98
23HC-IV-2-13	0.086894	0.002042	0.282648	0.000023	489	-4.31	5.72	832	1020	-0.94
23HC-IV-2-16	0.023959	0.000670	0.282470	0.000028	486	-10.59	-0.19	1043	1380	-0.98
23HC-IV-2-17	0.030901	0.000847	0.282520	0.000037	484	-8.84	1.46	980	1277	-0.97
23HC-IV-2-18	0.028121	0.000754	0.282503	0.000033	489	-9.45	0.99	1001	1309	-0.98

和 0.01%; MnO 含量分别为 0.12% 和 0.19%; $\text{Mg}^\#$ 值分别为 79.91 和 72.13; m/f 值分别为 3.95 和 2.55。

$\text{Mg}^\#$ 值是鉴别原生岩浆的重要标志之一, 一般认为与地幔橄榄岩平衡的原生岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 值为 63~

73(Frey et al., 1978; Rollinson, 1993); Hess(1992)认为, $\text{Mg}^\#$ 值应大于 68, 如果以 $\text{Mg}^\#$ 值为 63~73 代表或接近原生岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 值范围, 可以看出红川岩体中蛇纹石化橄榄岩和含斜长石橄榄岩的 $\text{Mg}^\#$ 值分别为

表 3 红川岩体全岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 3 Whole-rock major, trace, and rare earth elements data of the Hongchuan intrusions

元素	23HC-Ⅲ-1	23HC-Ⅲ-2	23HC-Ⅲ-3	23HC-Ⅳ-1	23HC-Ⅳ-2	23HC-Ⅳ-3
	黑云角闪石岩	黑云角闪石岩	黑云角闪石岩	黑云角闪石岩	含斜长石橄榄岩	橄榄岩
SiO ₂	46.28	45.16	46.35	43.84	45.62	39.13
TiO ₂	0.63	0.64	0.69	0.43	0.31	0.26
Al ₂ O ₃	12.21	11.54	11.88	10.92	10.37	6.27
TFe ₂ O ₃	11.48	11.93	12.60	13.39	11.69	13.68
MnO	0.15	0.16	0.17	0.19	0.19	0.12
MgO	14.59	15.98	13.69	15.62	15.27	27.47
CaO	9.79	9.73	10.35	11.60	12.19	4.18
Na ₂ O	1.16	1.26	1.36	1.59	2.09	0.30
K ₂ O	0.86	0.34	0.67	0.16	0.17	0.04
P ₂ O ₅	0.07	0.05	0.08	0.02	0.01	0.03
烧失量	2.51	2.48	2.02	2.20	1.66	8.32
总计	99.73	99.27	99.86	99.96	99.57	99.80
m/f	2.49	2.62	2.12	2.28	2.55	3.95
Mg [#]	71.57	72.63	68.28	69.80	72.13	79.91
La	2.33	1.90	5.88	2.40	1.69	1.03
Ce	5.86	4.38	13.32	4.94	3.35	2.22
Pr	0.78	0.64	1.69	0.67	0.46	0.31
Nd	3.98	3.20	7.66	3.21	2.29	1.57
Sm	1.45	1.16	2.35	1.19	0.88	0.58
Eu	0.63	0.50	0.89	0.57	0.48	0.26
Gd	2.19	1.85	3.22	1.75	1.29	0.85
Tb	0.44	0.38	0.60	0.34	0.24	0.16
Dy	3.06	2.68	3.94	2.23	1.65	1.05
Ho	0.67	0.61	0.84	0.47	0.35	0.23
Er	1.91	1.77	2.39	1.28	0.96	0.62
Tm	0.30	0.28	0.37	0.19	0.14	0.09
Yb	2.02	1.87	2.52	1.25	0.95	0.61
Lu	0.30	0.28	0.37	0.18	0.14	0.09
ΣREE	25.93	21.49	46.04	20.66	14.88	9.68
Li	24.25	22.97	18.80	13.54	7.58	6.10
Be	0.43	0.15	0.67	0.17	0.15	0.09
Sc	35.72	33.84	27.58	31.62	26.68	20.47
V	230.74	232.38	238.76	236.02	198.75	121.84
Cr	1602.60	2132.36	1528.25	1573.17	2278.36	3468.39
Co	73.56	73.56	88.01	95.37	96.26	123.05
Ni	479.02	546.63	436.18	579.53	629.24	1274.77
Cu	252.66	49.09	123.09	2.67	1.52	6.38
Zn	95.09	72.27	104.79	85.02	82.14	70.01
Ga	11.66	11.17	14.24	11.06	10.03	6.46
Rb	51.61	16.44	33.15	1.42	1.81	0.80
Sr	132.99	85.10	90.61	88.89	69.85	27.76

续表 3

元素	23HC-Ⅲ-1	23HC-Ⅲ-2	23HC-Ⅲ-3	23HC-Ⅳ-1	23HC-Ⅳ-2	23HC-Ⅳ-3
	黑云角闪石岩	黑云角闪石岩	黑云角闪石岩	黑云角闪石岩	含斜长石橄榄岩	橄榄岩
Y	19.60	17.52	24.03	12.95	9.91	6.45
Zr	34.69	32.58	58.77	22.40	15.96	13.07
Nb	2.13	1.90	3.39	1.49	1.23	0.72
Cd	0.27	0.21	0.26	0.12	0.11	0.05
In	0.06	0.05	0.06	0.05	0.04	0.03
Cs	0.91	0.74	0.51	0.06	0.04	0.43
Ba	214.68	51.35	153.04	15.14	14.59	11.98
Hf	1.00	0.95	1.63	0.69	0.48	0.39
Ta	0.51	0.36	0.85	0.55	0.81	0.26
Pb	7.77	5.84	25.40	1.71	1.82	0.89
Bi	0.55	0.14	0.11	0.03	0.03	0.01
Th	0.36	0.27	1.08	0.22	0.21	0.20
U	0.17	0.08	0.34	0.06	0.06	0.53
δEu	1.09	1.05	0.99	1.20	1.36	1.14
(La/Sm) _N	1.03	1.06	1.62	1.30	1.24	1.16
(La/Yb) _N	0.83	0.73	1.67	1.37	1.29	1.21
(Gd/Yb) _N	0.90	0.82	1.05	1.16	1.13	1.14

注: $m/f=(Mg^{2+}+Ni^{2+})/(Mn^{2+}+Fe^{2+})$ (摩尔比); $Mg^{\#}=Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})\times 100$ (摩尔比); $\delta Eu=2\times Eu_N/(Sm_N+Gd_N)$; “N”下标表示数值为球粒陨石标准化的值, 标准化数据据McDonough and Sun, 1995。主量元素含量单位为%; 微量和稀土元素含量单位为 10^{-6}

79.91 和 72.13, 主要由岩浆早期结晶的矿物相聚集而成, 黑云角闪石岩的 $Mg^{\#}$ 值为 68.28~72.63, 接近原始岩浆的值, 暗示了分离结晶作用的存在。

4.3.2 稀土和微量元素

红川岩体的稀土及微量元素的测试结果表明(表 3): 黑云角闪石岩的稀土元素总量(ΣREE)为

$20.66\times 10^{-6}\sim 46.04\times 10^{-6}$, 平均值为 28.53×10^{-6} ; 含斜长石橄榄岩和蛇纹石化橄榄岩的稀土元素总量分别为 14.88×10^{-6} 和 9.68×10^{-6} 。可以看出, 各类岩石样品的稀土元素总量总体较低, 在球粒陨石标准化稀土元素配分图(图 6-a)中, 表现为平坦型特征, 并由蛇纹石化橄榄岩、含斜长石橄榄岩至黑云角闪石岩, 稀土

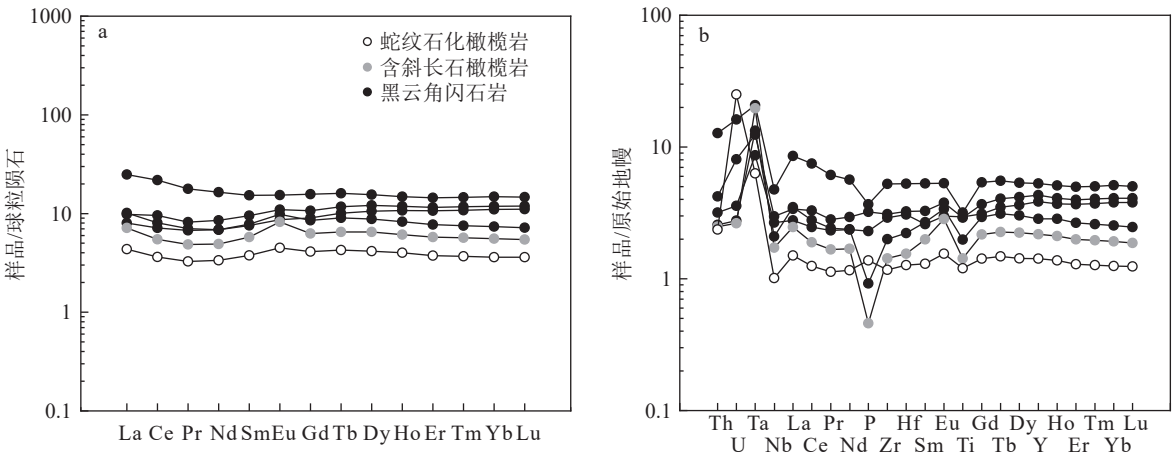


图 6 红川镁铁-超镁铁质岩体岩石球粒陨石标准化配分图(a)和原始地幔标准化蛛网图(b)

(球粒陨石和原始地幔标准化数值据 McDonough and Sun, 1995)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spider diagrams (b) of the Hongchuan mafic-ultramafic intrusions

元素总量有规律的升高,表明各类岩石可能为同源岩浆分异形成。黑云角闪石岩样品的 $(La/Yb)_N$ 值为 0.73~1.67,平均值为 1.15; $(La/Sm)_N$ 值为 1.03~1.62,平均值为 1.25; $(Gd/Yb)_N$ 值为 0.82~1.16,平均值为 0.98;含斜长石橄榄岩和蛇纹石化橄榄岩的 $(La/Yb)_N$ 值分别为 1.29 和 1.21, $(La/Sm)_N$ 值分别为 1.24 和 1.16, $(Gd/Yb)_N$ 值分别为 1.13 和 1.14,表明轻、重稀土元素之间和轻、重稀土元素内部分馏较弱。球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(图 6-a),总体显示出轻稀土元素富集、重稀土元素平坦的配分形式。全部样品的 δEu 值为 0.99~1.36,绝大多数样品未显示明显的 Eu 异常。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6-b)中,不同岩石类型的微量元素配分曲线变化一致,指示该岩体中不同岩石的岩浆源区及演化趋势相似,但在元素丰度上略有差别,总体来说均显示明显 Nb、P 和 Ti 的负异常,且 Nb-Ta 之间分异较大。

5 讨 论

5.1 岩体形成时代及构造背景

位于阿拉善地块和柴达木地块之间的祁连造山带,在区域上发育 2 条蛇绿岩带,以熬油沟-玉石沟-东沟-东草河蛇绿岩带构成北祁连南部蛇绿岩,形成时代为 513~497 Ma,是北祁连古大洋闭合的产物;以九个泉-大岔大坂-扁都口-老虎山构成的北部蛇绿岩形成时代集中于 505~448 Ma,是祁连古大洋北向俯冲形成的弧后盆地闭合增生的产物(夏小洪和宋述光, 2010; Song et al., 2013)。此外,北祁连造山带内弧岩浆作用发育,祁连山大洋俯冲带的初始俯冲发生于约 520 Ma,产生大量岛弧花岗岩,在早—中奥陶世(464.6~440.9 Ma)北祁连洋具有双向俯冲极性,早期形成具有大陆活动边缘特征的 I-S 过渡型花岗岩,晚期在北祁连造山带北东侧产生大量埃达克岩,在约 440 Ma 北祁连洋发生闭合(陈育晓等, 2012; 秦海鹏等, 2014)。同时,朱小辉等(2022)研究认为,中寒武世—志留纪(516~419 Ma)是祁连地区花岗质岩浆活动最强烈和复杂的时期。北祁连寒武纪—奥陶纪弧后盆地带位于岛弧带的后方,以往的研究查明,强烈的弧后海底扩张发生于弧后盆地带的东部(老虎山地区)和西部(大岔大坂和卡马尔沟—九个泉地区)。

本次对红川铜镍硫化物矿床中赋矿含斜长石橄榄岩开展了系统的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年。

然而,由于含斜长石橄榄岩样品为超镁铁质岩,获得了年龄范围跨度较大的锆石测年结果。部分地幔岩石中的锆石表现出无分带或弱分带的特征(吴元保和郑永飞, 2004)。本次获得的锆石年龄数据范围为 440~2557 Ma,年龄多介于 484~489 Ma 之间,该组数据的年龄加权平均值为 486.9 ± 5.9 Ma,结合区域背景看,这可能与该时期强烈活跃的岩浆活动有关。在区域大地构造位置上,红川镁铁—超镁铁岩体位于北祁连造山带西端,与前述的大版大岔和卡马尔沟—九个泉地区邻近。地球化学研究结果表明,红川镁铁—超镁铁岩体富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素(LREE),亏损 Nb、P、Ti 等高场强元素和重稀土元素(HREE),表现出岛弧岩浆岩的特征(Boynton, 1984)。弧岩浆的演化中常伴随 Nb/Ta 降低,本文测得的所有岩石样品 Nb 和 Ta 都表现出极大的分异,Chen et al.(2021a)研究发现,幔源岩浆化学成分由玄武质向长英质的转变主要发生在角闪石的稳定域,结合高温高压实验模拟和模型计算(丁兴和孙卫东, 2014),认为造成 Nb/Ta 分异的深部过程主要有:①流体作用,这是微观—宏观尺度上造成 Nb/Ta 分异最重要也是最常见的地质过程,该过程包括水-岩反应、流体交代作用和流体成分“自分异效应”;②热迁移作用;③特殊岩浆过程,如超过 80% 橄榄石和辉石的堆晶作用。因此,笔者认为,红川岩体中低 Nb/Ta 值的特征主要受控于岩石样品中发育的自形角闪石稳定域,且该岩体还经历了俯冲过程中的流体作用及大量橄榄石堆晶的特殊岩浆过程。综上并结合红川岩体岩石学特征和区域祁连古大洋俯冲形成的弧后盆地闭合时限分析(夏小洪和宋述光, 2010; Song et al., 2013),笔者认为红川超镁铁质岩体可能形成于岛弧环境。

5.2 地壳混染作用

对于红川超镁铁质岩体,准确评价其混染不但是岩石学问题,而且与矿床成因密切相关。据前人研究,幔源岩浆上升侵位过程中一般会受到不同程度的地壳混染(Mohr, 1987)。

从前述锆石 U-Pb 测年结果看,红川岩体中的锆石获得了老锆石的年龄信息,说明岩浆侵位过程中捕获了围岩中的锆石,表明存在同化混染作用。从元素地球化学角度看,可以选择具有相似配分系数的微量元素比值判断红川岩体岩浆的混染程度,因为这些比值在部分熔融和岩浆分异过程中不会发生

改变。红川岩体的 Ce/Pb 平均值为 1.79, 而典型地幔的 Ce/Pb 平均值为 25 (20~30), 地壳的 Ce/Pb 值小于 15 (Hofmann, 1988), 这一特征显示红川岩体遭受了一定程度的地壳混染。在微量元素比值相关性图解 (图 7-a, b) 中, 红川岩体 Zr/Nb-Nb/Ta、Ce/Pb-Th/Zr 具有一定的相关性, 进一步证实地壳混染的存在, 这一点与很多含铜镍硫化物的岩体特征一致 (Zhang et al., 2009)。由于红川岩体的稀土元素配分曲线为平坦型, 具有岛弧拉斑玄武岩特征, 因此可以选择原始地幔演化岩浆的微量元素作为模拟起始端元, 上地壳和下地壳为重点端元, 用不受蚀变影响的微量元素比值进行模拟计算, 结果表明, 红川岩体在岩浆侵位过程中遭受小于 10% 下地壳物质混染 (图 7-c, d)。

5.3 岩浆源区性质

锆石中具有较高的 Hf 含量及极低的 Lu 含量,

导致其具有非常低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$, 由 Lu 衰变形成的 ^{176}Hf 很少, 在其形成以后基本没有明显的放射性成因 Hf 的积累 (郑永飞等, 2007)。因此, 锆石可以记录岩浆源区不同性质的源岩特征, 成为探讨岩浆起源、地壳演化及壳幔相互作用过程的重要工具 (Amelin et al., 1999; Scherer et al., 2000; Griffin et al., 2002)。通常认为, 岩浆锆石的结晶年龄代表寄主岩的形成时代, 而锆石 Hf 同位素模式年龄代表源岩物质从亏损地幔分异的时代; 正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值表明岩浆源区为亏损地幔或新生地壳, 而负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值表明源区成分以地壳物质占主导或来源于富集地幔。红川岩体含斜长石橄榄岩中锆石 Hf 同位素特征显示, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ (初始值) 的范围为 0.282470~0.282673, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主要为正值, 变化范围在 -0.19~7.12 之间, 平均值为 3.38, 具有幔源岩浆成因的特征。对于幔源岩浆, 如果锆石母岩浆直接来源于未受任何影响的亏损地幔, 那么

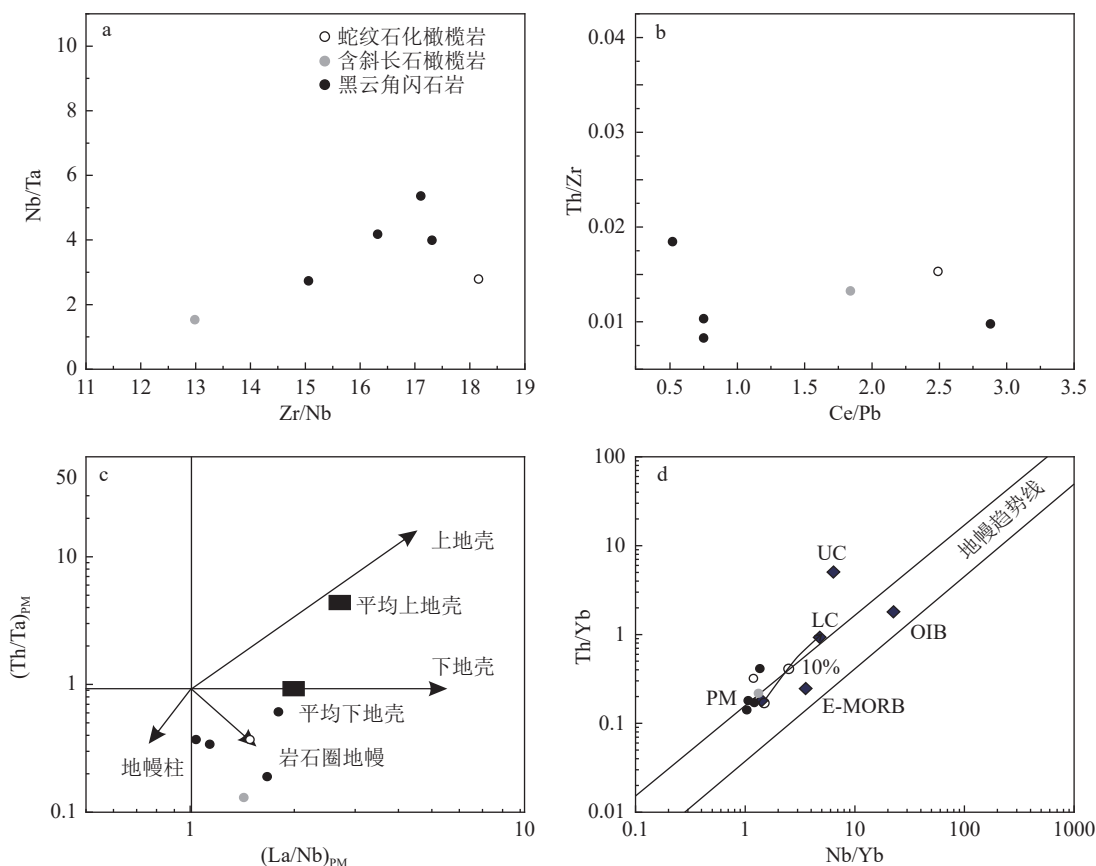


图 7 红川岩体 Zr/Nb-Nb/Ta(a)、Ce/Pb-Th/Zr(b)、 $(\text{La}/\text{Nb})_{\text{PM}}-(\text{Th}/\text{Ta})_{\text{PM}}$ (c) 和 Nb/Yb-Th/Yb(d) 相关图 (c 底图据 Neal et al., 2002; d 底图据 Pearce, 2008, 上地壳(UC)和下地壳(LC)值据 Zindler and Hart, 1986; Rudnick and Fountain, 1995; 原始地幔(PM)、洋岛玄武岩(OIB)和 E 型大洋中脊玄武岩(E-MORB)值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 The Zr/Nb-Nb/Ta (a), Ce/Pb-Th/Zr (b), $(\text{La}/\text{Nb})_{\text{PM}}-(\text{Th}/\text{Ta})_{\text{PM}}$ (c) and Nb/Yb-Th/Yb (d) correlation diagrams of Hongchuan mafic-ultramafic intrusions

锆石结晶年龄应该近似等于锆石 Hf 模式年龄, 而红川岩体锆石单阶段地幔 Hf 模式年龄 t_{DM1} 为 764~1043 Ma, 平均值为 911 Ma, 大于锆石结晶年龄, 表明红川镁铁—超镁铁质岩体受到地壳物质混染(吴福元等, 2007)。在年龄- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 图(图 8)中, 样品点全部落在球粒陨石演化线上或靠近亏损地幔一侧, 暗示锆石形成于源自球粒陨石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 稍有分异的亏损地幔岩浆, 有俯冲洋壳物质的参与(郑永飞等, 2007; 唐冬梅等, 2009)。

红川岩体的岩浆源自于亏损型地幔源区, 而岩体的微量元素标准化配分曲线具有平坦型特征, 显示了微量元素地球化学与同位素地球化学的不一致性。导致这种现象的原因主要有 3 种(Arculus and Johnson, 1981; Fujinawa, 1988; Hunter, 1998): ①是亏损型地幔经历非常低度部分熔融形成玄武质岩浆; ②是亏损型地幔通过低程度部分熔融形成玄武质岩浆(N-MORB 型)上升到上地壳经历较强的地壳混

染; ③是亏损型地幔部分熔融与消减板片脱水物质混合。前述地质研究显示, 红川岩体岩石由超镁铁质岩石组成, 非常低度部分熔融是不可能的。岩石地球化学研究证明, 红川岩体经历了小于 10% 的地壳混染, 上文中提到的微量元素地球化学与同位素地球化学的不一致性不可用强烈地壳混染作用来解释。因此, 最佳的解释是其地幔源区中含有相当数量被消减板片脱水和/或部分熔融交代的楔形地幔物质(段俊, 2012)。

红川超镁铁质岩石样品具有低硅、高镁, 略富集 LREE, 相对亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti、P), 且 Sr 含量显著高于地幔值(Taylor, 1985)(17.8×10^{-6})。岩石中的 Nb 和 Ta 元素含量明显低于地壳的平均含量(Rudnick and Fountain, 1995)(Nb= 8×10^{-6} , Ta= 0.7×10^{-6}), 此外, 红川超镁铁质岩石样品的 Ce/Pb 值平均为 1.79, 远低于典型地幔的 Ce/Pb 值(20~30)和大陆地壳的 Ce/Pb 平均值(普遍低于 15)

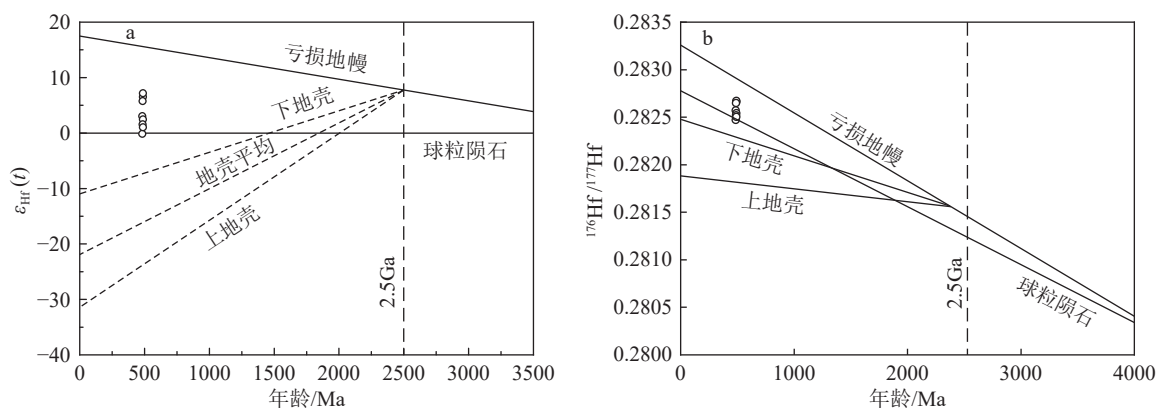


图 8 红川含斜长石橄榄岩锆石年龄- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解(a)和年龄- $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 图解(b)

Fig. 8 Zircon age- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram(a) and age- $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ diagram(b) of the Hongchuan plagioclase-bearing peridotites

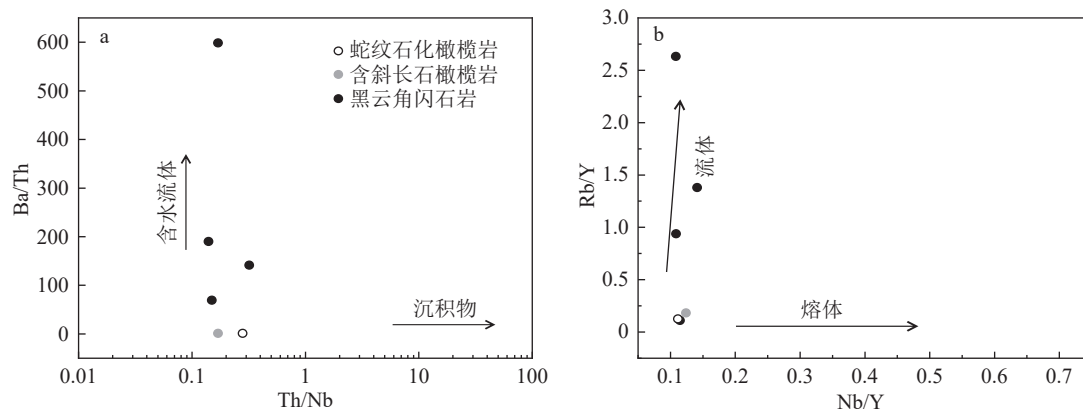


图 9 红川镁铁超镁铁质岩体岩石 Th/Nb-Ba/Th(a, 底图据 Hanyu et al., 2006)和 Nb/Y-Rb/Y(b, 底图据 Saunders et al., 1991)图解

Fig. 9 Th/Nb-Ba/Th (a) and Nb/Y-Rb/Y (b) diagrams of the Hongchuan mafic-ultramafic intrusions

(Hofmann, 1988), 小于 10% 的下地壳物质混染无法解释红川岩体中如此显著的低 Ce/Pb 值。因此, 以上特征表明, 岩浆源区混染了与俯冲消减有关的流体或交代改造的地幔楔物质, 并非来自单一地幔 (McCulloch and Gamble, 1991; Hawkesworth et al., 1993)。

微量元素比值(Ba/Th、Th/Nb、Nb/Yb、Th/Yb)可以有效地识别含水流体或俯冲带沉积物, 各类岩石具有相对稳定的 Th/Nb 和 Th/Yb 值(分别为 0.14~0.46 和 0.14~3.39), Ba/Th 值(10.42~598.69)变化范围较大(图 9-a), 在 Nb/Y-Rb/Y 图解中, 样品点表现出板片流体富集相关趋势(图 9-b)。当俯冲作用发生时, 高活动性元素(如 Rb、Ba、Sr 和 Cs)通常更倾向于进入板片来源流体, 而 Th 和轻稀土元素更容易进入沉积物来源的硅质熔体中(Plank and Wade, 2005; Oyhantçabal et al., 2007), 因此, 红川岩石样品中这些弧特征的“信号”应该是继承了早期俯冲作用相关流体交代地幔源区的特征。发育强烈的镁铁—超镁铁质岩浆活动且岩石圈地幔普遍经历俯冲交代作用是造山带的重要特征(Zanetti et al., 1999; Ducea et al., 2005; Spandler et al., 2014; Xue et al., 2018; Zong and Liu, 2018; Chen et al., 2021b; Song et al., 2021)。红川岩体中角闪石和磁铁矿的广泛分布进一步证明, 该岩体母岩浆富水且具有较高的氧逸度。综合本次研究结果, 结合研究区古祁连山俯冲的地质背景, 笔者认为形成红川岩体的岩浆源区很可能为经历过板片流体交代的亏损地幔。

6 结 论

(1)本次在红川铜镍矿区Ⅲ号、Ⅳ号镁铁—超镁铁质岩体中发现了铜镍矿体, 岩体主要岩相为橄榄岩相与黑云角闪石岩相, 其中橄榄岩相是主要赋矿岩相, 所含金属矿物有黄铜矿、磁铁矿、镍黄铁矿等。

(2)红川岩体中蛇纹石化橄榄岩、含斜长石橄榄岩和黑云角闪石岩具有富铁镁, 贫硅的地球化学特征, 这些岩石样品均具有相似的微量和稀土元素特征, 应属于同一岩浆演化的产物。

(3)通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素研究, 获得红川铜镍硫化物矿床中含斜长石橄榄岩的锆石年龄加权平均值为 486.9 ± 5.9 Ma, 该时期是北祁连造山带中重要的强烈岩浆活动阶段。相对应的锆石 Hf 同位素结果表明, 红川镁铁—超镁铁

质岩体的母岩浆来自于受到俯冲流体交代的亏损源区的部分熔融, 且在上升侵位过程中发生了小于 10% 的地壳混染。

致谢: 在野外勘查和样品采集过程中得到了甘肃省地质矿产勘查开发局第四地质矿产勘查院和中国地质调查局西安地质调查中心的指导和帮助; 两位匿名审稿专家悉心审稿并提出了宝贵意见和建议, 在此一并致以衷心感谢。

References

- Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. *Nature*, 399(6733): 252–255.
- Arculus R J, Johnson R W. 1981. Island-arc magma sources: A geochemical assessment of the roles of slab-derived components and crustal contamination[J]. *Geochemical Journal*, 15(3): 109–133.
- Bouvier A, Vervoort J D, Patchett P J. 2008. 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*, 273(1/2): 48–57.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[C]//Developments in geochemistry. Elsevier; 2: 63–114.
- Chen L M, Song X Y, Hu R Z, et al. 2021a. Mg-Sr-Nd isotopic insights into Petrogenesis of the Xiarihamu mafic-ultramafic intrusion, northern Tibetan plateau, China[J]. *Journal of Petrology*, 62(2): egaal13.
- Chen W, Zhang G, Ruan M, et al. 2021b. Genesis of intermediate and silicic arc magmas constrained by Nb-Ta fractionation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(3): e2020JB020708.
- Chen X H, Shao Z G, Xiong X S, et al. 2019. Fault system, deep structure and tectonic evolution of the Qilian Orogenic Belt, Northwest China[J]. *Geology in China*, 46(5): 995–1020 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y X, Xia X H, Song S G, et al. 2012. Petrogenesis of Aoyougou high-silica adakite in the North Qilian orogen, NW China: Evidence for decompression melting of oceanic slab[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(22): 2072–2085 (in Chinese with English abstract).
- Claesson S, Vetrin V, Bayanova T, et al. 2000. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: A record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic[J]. *Lithos*, 51(1/2): 95–108.
- Cong Z C. 2017. Study on metallogenic regularity of copper polymetallic deposit in the north Qilian, Qinghai[D]. PhD Thesis of Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Ding X, Sun W D. 2014. Nb-Ta differentiation and diagenesis and mineralization significance of deep earth processes: From micro to macro[C]//Annual Meeting of Chinese Geoscience Union. Beijing:

- Chinese Geophysical Society, Organizing Committee of the National Symposium on Petrology and Geodynamics, Special Committee of Structural Geology and Geodynamics, Chinese Geological Society, Regional Geology and Metallogeny Committee of Chinese Geological Society, 2014: 6 (in Chinese).
- Duan J, 2012. Petrogenesis and metallogenic potential of Zangbutai mafic-ultramafic intrusion in Longshoushan, Gansu province[D]. Master Thesis of Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Duan J, Li C, Qian Z, et al. 2015. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis and tectonic significance of Paleozoic dolerite dykes in the southern margin of Alxa Block, North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 244–253.
- Duan J, Qian Z Z, Jiao J G, et al. 2015. Genesis of the Xijing intrusion from longshoushan terrane and tectonic significance[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 45(3): 832–846 (in Chinese with English abstract).
- Ducea M N, Saleeby J, Morrison J, et al. 2005. Subducted carbonates, metasomatism of mantle wedges, and possible connections to diamond formation: an example from California[J]. *American Mineralogist*, 90(5/6): 864–870.
- Fan X X, Kong W Q, Yang Z X, et al. 2020. U–Pb chronology, geochemical characteristics and petrogenesis of the Chelugou pluton in the western part of North Qilian orogenic belt[J]. *Geology in China*, 47(3): 755–766 (in Chinese with English abstract).
- Frey F, Green D, Roy S. 1978. 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*, 19(3): 463–513.
- Fujinawa A. 1988. Tholeiitic and calc-alkaline magma series at Adataro volcano, northeast Japan: 1. Geochemical constraints on their origin[J]. *Lithos*, 22(2): 135–158.
- Ge X H, Liu J L. 1999. Formation and tectonic background of the northern Qilian orogenic belt[J]. *Earth Science Frontiers*, (4): 223–230 (in Chinese with English abstract).
- Gong Z Z, Yang Z X, Zhao J C, et al. 2025. The first discovery of medium scale magmatic molten nickel deposit in the western part of the north Qilian orogenic belt[J/OL]. *Geology in China*: 1–3[2025-03-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20230220.1509.002.html> (in Chinese with English abstract).
- Gong Z Z, Yang Z X, Zhou D F, et al. 2024. The Zircon U–Pb age of the ultrabasic intrusion of Hongchuan copper–nickel deposit in the west of the Northern Qilianshan Orogenic[J]. *Geology in China*, 51(1): 364–365 (in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM–MC–ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147.
- Griffin W, Wang X, Jackson S, et al. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3/4): 237–269.
- Hanyu T, Tatsumi Y, Nakai S I, et al. 2006. Contribution of slab melting and slab dehydration to magmatism in the NE Japan arc for the last 25 Myr: Constraints from geochemistry[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(8): Q08002.
- Hawkesworth C, Gallagher K. 1993. Mantle hotspots, plumes and regional tectonics as causes of intraplate magmatism[J]. *Terra Nova*, 5(6): 552–559.
- Hess P C. 1992. Dissolution of Plagioclase and the Origin of Mg–Suite Parent Magmas[C]//Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference, XXIII: 529–530.
- Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297–314.
- Hoskin P, Black L. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423–439.
- Hunter A. 1998. Intracrustal controls on the coexistence of tholeiitic and calc-alkaline magma series at Aso Volcano, SW Japan[J]. *Journal of Petrology*, 39(7): 1255–1284.
- LI C M. 2009. A Review on the Minerageny and Situ Microanalytical Dating Techniques of Zircons[J]. *Geological Survey and Research*, 32(3): 161–174 (in Chinese with English abstract).
- Li S J. 2011. Geodynamic evolution of Qilian orogenic belt and metallogenesis of endogenous metals[D]. PhD Thesis of Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Li W Y. 2004. Main mineral deposit associations in the Qilian Mountains and their metallogenic dynamics[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(3): 313–320 (in Chinese with English abstract).
- Li W Y. 2022. Study of ore-forming theoretical innovation and prospecting breakthrough of magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposits in China[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 793–820 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y X, Sha X, Ma Z, et al. 2018. Geochemical characteristics and tectonic implication of the shuanglong mafic-ultramafic rocks in western section of the north Qilian[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(2): 383–397 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Gao S, Hu Z, et al. 2010. 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*, 51(1/2): 537–571.
- Ludwig K. 2003. A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. *Isoplot*, 3: 1–70.
- Mao J W, Pirajno F, Zhang Z H, et al. 2008. A review of the Cu–Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal characteristics and ore-forming processes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2/4): 184–203.
- McCulloch M T, Gamble J. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3/4): 358–374.
- McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J].

- Chemical geology, 120(3/4): 223–253.
- Mohr P A. 1987. Crustal contamination in mafic sheets: a summary[J]. Mafic Dyke Swarms. Special Publication–Geological Association of Canada, 34: 75–80.
- Neal C, Mahoney J, Chazey III W. 2002. 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*, 43(7): 1177–1205.
- Oyhantçabal P, Siegesmund S, Wemmer K, et al. 2007. Post-collisional transition from calc-alkaline to alkaline magmatism during transcurrent deformation in the southernmost Dom Feliciano Belt (Braziliano–Pan–African, Uruguay)[J]. *Lithos*, 98(1/4): 141–159.
- Pearce J A. 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. *Lithos*, 100(1/4): 14–48.
- Plank T, Wade J. 2005. Constraints from water on mantle melting and slab fluid composition[C]//AGU Fall Meeting, London.
- Qin H P, Wu C L, Wang C S, et al. 2014. LA-ICP-MS Zircon U–Pb geochronology and geochemical characteristics of Xiagucheng granite in North Qilian[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(10): 1832–1842 (in Chinese with English abstract).
- Qin K Z, Tang D M, Su B X, et al. 2012. The tectonic setting, style, basic feature, relative erosion degree, ore-bearing evaluation sign, potential analysis of mineralization of Cu–Ni-bearing Permian mafic ultramafic complexes, Northern Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 45(4): 83–116 (in Chinese with English abstract).
- Rollinson H. 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation[M]. London: Longman: 171–214.
- Rudnick R L, Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267–309.
- Saunders A, Norry M, Tarney J. 1991. Fluid influence on the trace element compositions of subduction zone magmas[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Physical and Engineering Sciences*, 335(1638): 377–392.
- Scherer E E, Cameron K L, Blichert-Toft J. 2000. Lu–Hf garnet geochronology: closure temperature relative to the Sm–Nd system and the effects of trace mineral inclusions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(19): 3413–3432.
- Scherer E, Munker C, Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium–hafnium clock[J]. *Science*, 293(5530): 683–687.
- Sha X, Chen S Q, He Z X, et al. 2016. Geochemical Features of Kawa Iron Ore Deposit in the Western Section of the North Qilian Mountains and Their Geological Significance[J]. *Geology and exploration*, 52(4): 657–666 (in Chinese with English abstract).
- Song S, Niu Y, Su L, et al. 2013. Tectonics of the north Qilian orogen, NW China[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1378–1401.
- Song X Y, Deng Y F, Xie W, et al. 2021. Prolonged basaltic magmatism and short-lived magmatic sulfide mineralization in orogenic belts[J]. *Lithos*, 390: 106114.
- Song X Y, Yi J N, Chen L M, et al. 2016. The giant Xiarihamu Ni–Co sulfide deposit in the East Kunlun orogenic belt, northern Tibet plateau, China[J]. *Economic Geology*, 111(1): 29–55.
- Spandler C, Pettke T, Hermann J. 2014. Experimental study of trace element release during ultrahigh-pressure serpentinite dehydration[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 391: 296–306.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345.
- Tang D M, Qin K Z, Sun H, et al. 2009. Lithological, chronological and geochemical characteristics of Tianyu Cu–Ni deposit: Constraints on source and genesis of mafic-ultramafic intrusions in eastern Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 817–831 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution[M]. Oxford Press, Blackwell: 1–312.
- Vervoort J D, Patchett P J. 1996. Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: constraints from Precambrian crustally derived granites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(19): 3717–3733.
- Wang R M, Liu D Q, Yin D T. 1987. Study of metallogenic and ore-controlling factors with prospecting direction of Cu–Ni sulfide deposits in Tudun–Huangshan region, Hami, Xinjiang[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 7(1): 1–152 (in Chinese).
- Wang Y X, Pu W F, Li T G, et al. 2024. Main types of magmatism gold deposits and their mineralization in Gansu Province. Geological Bulletin of China, 43(6): 869–884 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F, et al. 2007. Lu–Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- Wu Y B, Zheng Y F. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U–Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y. 1996. Characteristics of Mid Late Proterozoic Volcanic Rocks and Cleavage of Precambrian Continental in Southern Qinling Mountains[J]. *Science China Earth Sciences*, (3): 237–243 (in Chinese).
- Xia X H, Song S G. 2010. Forming age and tectono-petro-genesis of the Jiugequan ophiolite in the North Qilian Mountain, NW China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1465–1473 (in Chinese with English abstract).
- Xue S C, Liu J Y, Zhou Y, et al. 2024. Genetic correlation of metasomatized mantle source with Ni–Cu mineralization in orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 40(1): 60–78(in Chinese with English abstract).
- Xue S, Li C, Qin K, et al. 2018. Sub-arc mantle heterogeneity in oxygen isotopes: evidence from Permian mafic-ultramafic intrusions in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 173: 1–13.
- Xue S, Qin K, Li C, et al. 2016. Geochronological, petrological, and geochemical constraints on Ni–Cu sulfide mineralization in the Poyi ultramafic-troctolitic intrusion in the northeast rim of the Tarim craton, western China[J]. *Economic Geology*, 111(6): 1465–1484.

- Yang H Q, Zhao D H, Wang Y H, et al. 2009. Essential factors and model for prediction of Jingti-eshan-type copper deposits in the western segment of the North Qilian mountains[J]. *Geoscience*, 23(2): 269–276 (in Chinese with English abstract).
- Yu J Y, Li X M, Wang G Q, et al. 2010. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircon from the Hamandaban granite body in the Honggou area, Qinghai Province: New Evidence For metallogenic age and causes of the Honggou copper polymetallic deposit[J]. *Geology and Exploration*, 46(4): 592–598 (in Chinese with English abstract).
- Zanetti A, Mazzucchelli M, Rivalenti G, et al. 1999. The Finero phlogopite-peridotite massif: an example of subduction-related metasomatism[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134: 107–122.
- Zhang Z, Mao J, Chai F, et al. 2009. Geochemistry of the Permian Kalatongke mafic intrusions, northern Xinjiang, northwest China: implications for the genesis of magmatic Ni-Cu sulfide deposits[J]. *Economic Geology*, 104(2): 185–203.
- Zheng Y F, Chen R X, Zhang S B, et al. 2007. Zircon Lu-Hf isotope study of ultrahigh-pressure eclogite and granitic gneiss in the Dabie orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 317–330 (in Chinese with English abstract).
- Zhu X H, Chen D L, Feng Y M, et al. 2022. Granitic magmatism and tectonic evolution in the Qilian Mountain range in NW China: A review[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(2): 241–260 (in Chinese with English abstract).
- Zindler A, Hart S R. 1986. Chemical Geodynamics[J]. *Annual review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493–571.
- Zong K, Liu Y. 2018. Carbonate metasomatism in the lithospheric mantle: Implications for cratonic destruction in North China[J]. *Science China Earth Sciences*, 61: 711–729.
- ### 附中文参考文献
- 陈宣华, 邵兆刚, 熊小松, 等. 2019. 祁连造山带断裂构造体系、深部结构与构造演化[J]. *中国地质*, 46(5): 995–1020.
- 陈育晓, 夏小洪, 宋述光. 2012. 北祁连山西段志留纪高硅埃达克岩: 洋壳减压熔融的证据[J]. *科学通报*, 57(22): 2072–2085.
- 丛智超. 2017. 青海北祁连铜多金属矿床成矿规律研究[D]. 吉林大学博士学位论文.
- 丁兴, 孙卫东. 2014. 地球深部过程的Nb/Ta分异及成岩成矿意义: 从微观到宏观[C]//2014年中国地球科学联合学术年会-专题44: 造山带深部地质过程论文集. 北京: 中国地球物理学会, 全国岩石学与地球动力学研讨会组委会, 中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会, 中国地质学会区域地质与成矿专业委员会, 2014.
- 段俊, 钱壮志, 焦建刚, 等. 2015. 甘肃龙首山岩带西井镁铁质岩体成因及其构造意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 45(3): 832–846.
- 段俊. 2012. 甘肃龙首山地区藏布台镁铁-超镁铁质岩体岩石成因及成矿潜力[D]. 长安大学硕士学位论文.
- 樊新祥, 孔维琼, 杨镇熙, 等. 2020. 北祁连造山带西段车路沟岩体U-Pb年代学、地球化学特征及岩石成因[J]. *中国地质*, 47(3): 755–766.
- 葛肖虹, 刘俊来. 1999. 北祁连造山带的形成与背景[J]. *地学前缘*, (4): 223–230.
- 龚振中, 杨镇熙, 赵吉昌, 等. 2023. 北祁连造山带西段首次发现中型岩浆熔离型镍矿床[J/OL]. *中国地质*: 1–3[2025-03-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20230220.1509.002.html>.
- 龚振中, 杨镇熙, 周登峰, 等. 2024. 北祁连西段红川铜镍矿超基性岩体锆石U-Pb年龄[J]. *中国地质*: 364–365.
- 李世金. 2011. 祁连造山带地球动力学演化与内生金属矿产成矿作用研究[D]. 吉林大学博士学位论文.
- 李文渊. 2004. 祁连山主要矿床组合及其成矿动力学分析[J]. *地球学报*, 25(3): 313–320.
- 李文渊. 2022. 中国岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿理论创新和找矿突破[J]. *地质力学学报*, 28(5): 793–820.
- 李长民. 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. *地质调查与研究*, 32(3): 161–174.
- 刘懿馨, 沙鑫, 马蓁, 等. 2018. 北祁连西段双龙镁铁质-超镁铁质岩地球化学特征及构造意义[J]. *岩石学报*, 34(2): 383–397.
- 秦海鹏, 吴才来, 王次松, 等. 2014. 北祁连下古城花岗岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学及岩石化学特征[J]. *地质学报*, 88(10): 1832–1842.
- 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 等. 2012. 北疆二叠纪镁铁-超镁铁岩铜、镍矿床的构造背景、岩体类型、基本特征、相对剥蚀程度、含矿性评价标志及成矿潜力分析[J]. *西北地质*, 45(4): 83–116.
- 沙鑫, 陈世强, 何兆祥, 等. 2016. 北祁连西段卡瓦铁矿的地球化学特征及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 52(4): 657–666.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙赫, 等. 2009. 天宇铜镍矿床的岩相学、锆石U-Pb年代学、地球化学特征: 对东疆镁铁-超镁铁质岩体源区和成因的制约[J]. *岩石学报*, 25(4): 817–831.
- 王润民, 刘德权, 殷定泰. 1987. 新疆哈密土墩—黄山一带铜镍硫化物矿床成矿控制条件及找矿方向的研究[J]. *矿物岩石*, 7(1): 1–152.
- 王玉玺, 蒲万峰, 李通国, 等. 2024. 甘肃省主要岩浆作用金矿床类型及其成矿作用[J]. *地质通报*, 43(6): 869–884.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, (2): 185–220.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 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*, 49(16): 1589–1604.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996. 南秦岭中—晚元古代火山岩性质与前寒武纪大陆裂解[J]. *中国科学(D辑)*, (3): 237–243.
- 夏小洪, 宋述光. 2010. 北祁连山南九个泉蛇绿岩形成年龄和构造环境[J]. *科学通报*, 55(15): 1465–1473.
- 薛胜超, 刘金宇, 周翊, 等. 2024. 交代地幔源区与造山带铜镍成矿作用[J]. *岩石学报*, 40(1): 60–78.
- 杨合群, 赵东宏, 王永和, 等. 2009. 北祁连西段镜铁山式铜矿预测要素及预测模型[J]. *现代地质*, 23(2): 269–276.
- 余吉远, 李向民, 王国强, 等. 2010. 青海红沟地区哈曼大阪花岗岩体锆石LA-ICP-MS测年——对红沟铜矿床形成时代和成因的认识[J]. *地质与勘探*, 46(4): 592–598.
- 郑永飞, 陈仁旭, 张少兵, 等. 2007. 大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石Lu-Hf同位素研究[J]. *岩石学报*, 23(2): 317–330.
- 朱小辉, 陈丹玲, 冯益民, 等. 2022. 祁连山地区花岗质岩浆作用及构造演化[J]. *地学前缘*, 29(2): 241–260.