



引文格式: 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2025089

Citation: 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2025089

## 甘肃省基性-超基性岩时空分布与铜镍硫化物矿资源潜力

张翔<sup>1</sup>, 黄增保<sup>1</sup>, 陈世强<sup>2</sup>, 司豪佳<sup>1</sup>, 徐锡东<sup>1</sup>, 王永强<sup>2</sup>, 李文轩<sup>1</sup>,  
刘子锐<sup>1</sup>, 胡妍<sup>3</sup>, 龚振中<sup>4</sup>

(1. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省地质矿产勘查开发局第二地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730020; 3. 甘肃省地质矿产勘查开发局, 甘肃 兰州 730000; 4. 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)

**摘要:** 岩浆铜镍硫化物矿床是西北地区主要的铜镍矿床类型。近年来, 甘肃省地矿局在北山、阿尔金山、祁连山等地区针对铜镍硫化物矿床开展了找矿勘查, 并取得了一定进展, 其成果受到行业高度关注。笔者系统总结了甘肃重要铜镍硫化物矿床研究新进展和红川、大敖包沟等铜镍硫化物矿床找矿亮点, 系统梳理和总结了甘肃省基性-超基性岩体(群)时空分布、岩浆型铜镍硫化物矿成矿地质条件、主要矿床类型和典型岩浆铜镍硫化物矿床特征, 分析了甘肃省岩浆铜镍硫化物矿床的找矿潜力, 划分了找矿远景区, 圈定了找矿靶区, 提出了找矿方向, 为找矿勘查实践和理论研究提供了依据。

**关键词:** 基性-超基性岩; 铜镍硫化物矿床; 资源潜力; 战略性矿产; 甘肃省

中图分类号: P587; P618.63

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)04-0069-18

### Temporal and Spatial Distribution of Basic-Ultrabasic Rocks and the Resource Potential of Cu-Ni Sulfide Deposit in Gansu Province, China

ZHANG Xiang<sup>1</sup>, HUANG Zengbao<sup>1</sup>, CHEN Shiqiang<sup>2</sup>, SI Haojia<sup>1</sup>, XU Xidong<sup>1</sup>, WANG Yongqiang<sup>2</sup>, LI Wenxuan<sup>1</sup>,  
LIU Zirui<sup>1</sup>, HU Yan<sup>3</sup>, GONG Zhenzhong<sup>4</sup>

(1. Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. The Second Geological and Mineral Exploration Institute, Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 730020, Gansu, China; 3. Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 730000, Gansu, China; 4. Fourth Geological and Mineral Exploration Institute, Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, Jiuquan 735000, Gansu, China)

**Abstract:** Magmatic Ni-Cu sulfide are the main type of deposits in northwest China. Gansu Provincial Bureau

收稿日期: 2024-12-17; 修回日期: 2025-04-08; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 甘肃省级基础地质调查项目“甘肃省岩浆型铜镍硫化物矿床成矿作用与预测研究”([2024]76号-39), 甘肃省地勘基金资助项目“甘肃省瓜州县铭杨铜镍矿普查”(202004-D03), 甘肃省地矿局创新资金项目“甘肃岩浆铜镍硫化物矿床找矿预测研究及勘查实施方案编制”(甘地矿函[2023]5号)联合资助。

作者简介: 张翔(1966-), 男, 正高级工程师, 长期从事区域地质与成矿地质研究工作。E-mail: 916685598@qq.com。

of Geology and Mineral Exploration & Development has made some progress in the prospecting and exploration of Ni-Cu sulfide deposits in Beishan, Altun mountain, Qilian mountain and other areas in recent years, and its exploration and research achievements have been highly concerned by the industry. This paper systematically summarizes the new progress in the research of important Ni-Cu sulfide deposits in Gansu Province and the new breakthroughs in the prospecting of copper-nickel sulfide deposits such as Hongchuan and Da'aobaogou. The spatial and temporal distribution of mafic-ultramafic rock bodies (groups) in Gansu Province, the metallogenic geological conditions of magmatic Ni-Cu sulfide deposits, the main types of deposits and the characteristics of typical magmatic copper-nickel sulfide deposits are systematically sorted out and summarized. It analyzes the prospecting potential of magmatic copper-nickel sulfide deposits in Gansu Province and predicts prospective areas and important mineralized belts for prospecting. The prospecting direction is proposed, which provides important theoretical guidance for prospecting practice and theoretical research.

**Keywords:** mafic-ultramafic rocks; Cu-Ni sulfide deposit; resource potential; strategic mineral resources; Gansu Province

岩浆铜镍硫化物矿床来源于上地幔, 主要形成于大陆裂谷和造山带的伸展环境(姜常义等, 2012, 2015; 李文渊, 2022; 高晓峰等, 2025)。世界上绝大多数该类矿床都产于克拉通边缘, 与大陆裂谷伸展环境有关(Naldrett, 1989, 2004; Horan et al., 1995; Pirajno, 2000; Arndt et al., 2003)。甘肃铜镍硫化物矿床形成背景较复杂, 金川铜镍矿主要为大陆裂谷伸展环境, 其次为造山后伸展环境。汤中立提出的“小岩体成大矿”成矿理论(汤中立等, 1989, 1992, 1995, 2006), 作为岩浆铜镍硫化物矿床找矿勘查的指导思想, 切实有效指导了岩浆铜镍硫化物矿床找矿突破。笔者在甘肃省基础地质项目资助下对甘肃岩浆型铜镍硫化物矿床开展研究, 系统整理了以往和近年来该省镍矿的勘查和研究成果, 通过对基性—超基性岩体时空分布、成矿地质条件、岩石学特征、岩石地球化学特征及成矿潜力分析研究, 认为甘肃省仍具有良好的岩浆铜镍硫化物矿床成矿潜力。

## 1 甘肃省基性—超基性岩体(群)时空分布与铜镍矿成矿地质条件

### 1.1 甘肃省基性—超基性岩体(群)时空分布特征

甘肃省基性—超基性岩从时间上大致可分为新元古代、早古生代和晚古生代, 空间上与成矿有关的岩体主要分布于龙首山、北山、阿尔金山—祁连山地区(图1)。

#### 1.1.1 新元古代基性—超基性岩

甘肃省新元古代基性—超基性岩体主要分布在龙首山、北山地区、祁连山西段和阿尔金地区。龙首山

地区主要有藏布台岩体群和金川岩体群。其中, 藏布台岩体群全岩 Sm-Nd 等时线年龄为  $(1\,511 \pm 168)\text{Ma} \sim (1\,410 \pm 31)\text{Ma}$ (李文渊等, 2004; 段俊, 2012); 金川岩体群全岩 Sm-Nd 等时线年龄介于  $(1508 \pm 31)\text{Ma} \sim (970 \pm 0.31)\text{Ma}$ (汤中立等, 1992; 李文渊等, 2004; 杨胜洪等, 2007), 二辉橄榄岩锆石 U-Pb 年龄为  $800\text{Ma} \sim 827\text{Ma}$ (李献华等, 2004; Su et al., 2004; 田毓龙等, 2007), 铜镍矿石 Re-Os 同位素年龄介于  $(1\,043 \pm 28)\text{Ma} \sim (852 \pm 25)\text{Ma}$ (张宗清等, 2004; Keays et al., 2004; Yang et al., 2004), 由于测试方法和测试对象的不同, 岩体形成时代跨度较大, 目前接近一致的认识是岩体为新元古代岩浆作用的产物。

北山地区元古代基性—超基性岩有马鬃山岩体群、柳园东北岩体群等, 二者全岩 Sm-Nd 等时线年龄分别为  $(1\,027 \pm 45)\text{Ma}$  和  $(1\,062 \pm 15)\text{Ma} \sim (1\,749 \pm 24)\text{Ma}$ (白云来等, 2002)。

近年来在阿尔金—祁连西段也发现有新元古代基性—超基性岩体, 祁连山西段红川含铜镍超基性岩Ⅲ号岩体强蛇纹石化辉橄岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $(590.9 \pm 2.1)\text{Ma}$ , IV号岩体中黑云角闪石岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $(585.1 \pm 4.3)\text{Ma}$ (龚振中, 2024), 表明红川铜镍矿成岩成矿时代为新元古代。

#### 1.1.2 早古生代基性—超基性岩体(群)

甘肃省早古生代基性—超基性岩体主要分布在祁连山、阿尔金、北山地区, 形成时代为早寒武世—中奥陶世。

##### 1.1.2.1 祁连地区早古生代基性—超基性岩

祁连地区早古生代基性—超基性主要分布在北祁

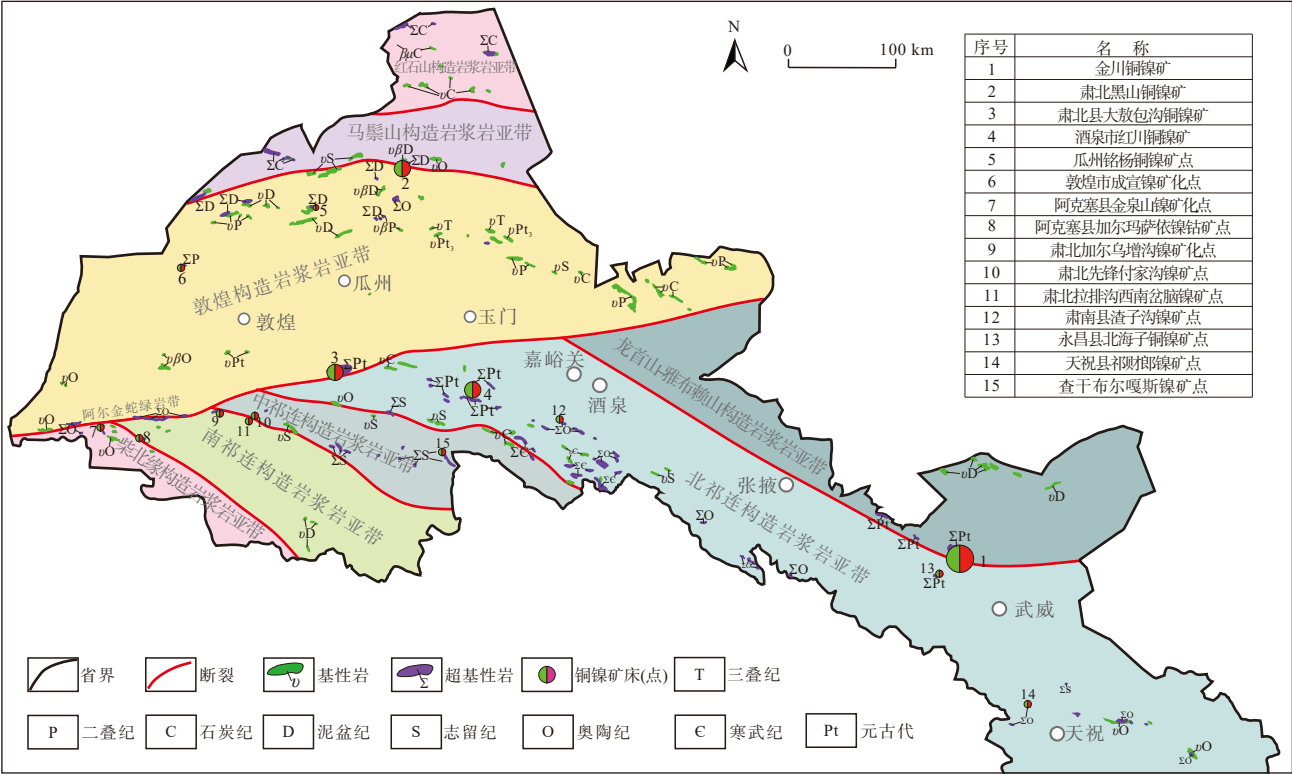


图1 甘肃省典型铜镍硫化物矿床及基性-超基性岩分布图

Fig. 1 Distribution of typical magmatic Ni-Cu sulfide and basic-ultrabasic rocks in Gansu Province.

连造山带,少数分布在中、南祁连造山带内(图2)。

北祁连早古生代基性-超基性带:西起昌马乡,东至景泰米家山一带,呈NW-SE向展布,长为700余km,宽约为40~70 km。沿区域断裂带集中分布,共有基性-超基性岩体1183个,其中超基性岩体880个,基性-超基性杂岩体(群)10个,基性岩体293个。多数为蛇绿岩套的组成部分,构成俯冲杂岩带。岩体多

呈北倾的单斜体、楔状体、脉状体、凸镜体,少数为团块状产出。超基性岩体岩石类型有蛇纹石化辉石橄榄岩、纯橄岩、斜辉辉橄岩、蛇纹岩等。基性岩体岩石类型有辉长岩、辉绿岩等。据同位素测年资料,玉石沟、熬油沟、大岔大坂、九个泉、老虎山等基性-超基性杂岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄介于(448±5) Ma~(550±17) Ma(史仁灯等,2004;相振群

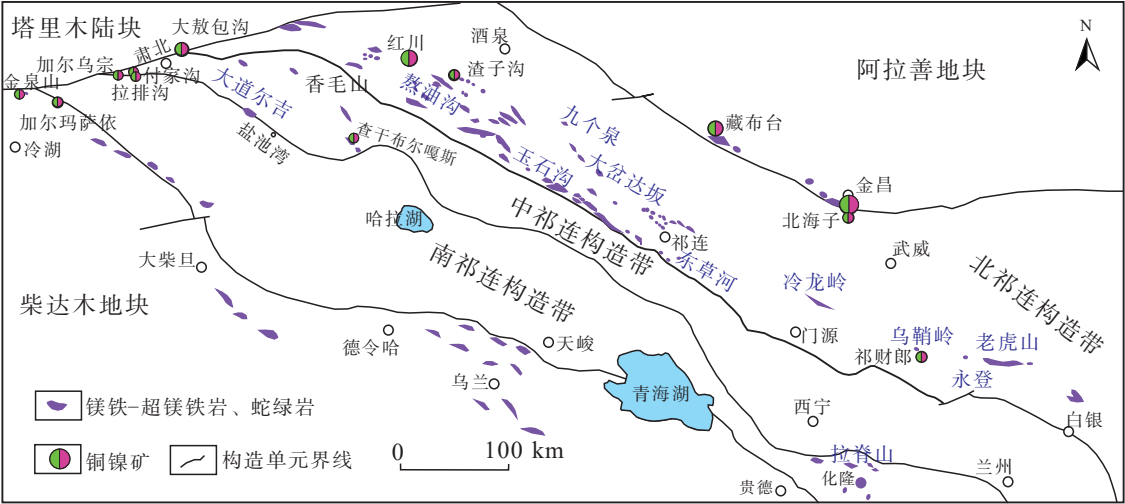


图2 北祁连西段基性-超基性岩分布图

Fig. 2 Distribution of basic-ultrabasic rocks in west section of northern Qilian Mountains.

等, 2007; 孟繁聪等, 2010; 夏小洪等, 2010, 2012; Song et al., 2013), 形成于早寒武世—中奥陶世。

中祁连早古生代基性—超基性岩带: 沿中祁连西段月牙湖—盐池湾—宰吾结勒—木里—大通—兰州一线分布, 东西长约为 500 km, 宽为 80 余 km。带内共有基性—超基性岩体(群) 127 个, 其中超基性岩体 90 个, 基性—超基性杂岩体(群) 4 个, 基性岩体 33 个, 岩体形态呈透镜状、扁豆状, 不规则状 NW 向展布。

南祁连早古生代基性—超基性带: 沿党河南山—拉脊山展布。共有基性—超基性岩体 95 个, 其中超基性岩体 88 个, 基性岩体 7 个。岩体多呈扁豆状、脉状, 走向 NW 向和近 EW 向, 倾向 NE、NW。黄增保(2012) 获得南祁连大道尔吉岩体全岩 Sm-Nd 同位素为 441 Ma, 形成时代为早志留世。

#### 1.1.1.2 阿尔金地区早古生代基性—超基性带

主要分布在拉配泉—红柳沟蛇绿混杂岩带中, 如金泉山岩体、安南坝岩体、红柳沟岩体、加尔玛萨依岩体等, 形成年龄为早寒武世( $514.6 \pm 8.8$ ) Ma(王军等, 2018)。该岩带由 10 余个超基性岩、基性—超基性岩和基性岩体(群) 组成, 呈脉状及小岩珠产出, 个别呈岩墙状产出。铜镍矿化多成星点状出现, 含镍一般 0.02%~0.40%; 其中, 安南坝超基性岩含铜 0.03%~0.08%, 镍 0.26%; 拉排沟超基性岩体含镍 0.20%~0.4%, 铜为 0.05%~0.20%。

#### 1.1.1.3 北山地区早古生代基性—超基性带

北山地区早古生代基性—超基性岩体主要分布在红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿混杂岩带, 包括玉石山基性—超基性岩体(群) 和火石山基性—超基性岩体(群)。

玉石山基性—超基性岩体(群): 岩体主要由橄榄岩、蛇纹岩、辉长岩组成, 呈岩片产出。辉长岩锆石 U-Pb 年龄为( $525.3 \pm 3.6$ ) Ma(任文秀等, 2020), 形成于早寒武世, 为弧后盆地环境产物。

火石山基性—超基性岩体(群): 呈近 NWW 向展布于火石山一带, 由大小不一的超基性岩、基性岩岩片组成蛇绿混杂岩带。超基性岩为蚀变橄榄岩、蚀变紫苏辉石岩; 基性岩主要为辉长岩。

铭铭含铜镍超基性岩, 岩石以橄榄辉长岩为主, 局部伴生辉石橄榄岩, 呈透镜状北倾单斜产出, 由中心向边缘依次为辉长岩相→橄榄辉长岩相→橄榄岩相。通过对橄榄辉长岩、辉长岩开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 获得杂岩体边缘相橄榄辉长岩成岩年龄为( $452.9 \pm 2.4$ ) Ma, 岩体中心相灰白色粗粒辉长岩

成岩年龄为( $457.7 \pm 2.1$ ) Ma; 二者均属晚奥陶世(谢燮等, 2024)。

#### 1.1.3 晚古生代基性—超基性岩体

晚古生代基性—超基性岩体在北山地区出露广泛, 典型铜镍矿化岩体有四顶黑山、红柳沟、大头山南、黑山、怪石山和成宣基性—超基性岩体等。在黑山岩体中已发现黑山中型铜镍矿床, 北山中带已发现的黑山、红柳沟、大头山南、怪石山含铜镍岩体多形成于泥盆纪, 且活动时限持续相对较长(353~397 Ma), 具多期活动的特点, 揭示了北山中带基性—超基性岩带的找矿潜力(王磊等, 2015; 王小红等, 2023)。此外, 在龙首山地区晚古生代侵入的北海子岩体和小口子岩体也见有铜镍硫化物矿化。近年来, 在阿尔金断裂北侧敦煌地块内发现大敖包沟铜镍矿化镁铁—超镁铁质岩。

四顶黑山基性—超基性岩体: 分布在北山北部的四顶黑山一带, 呈岩株、岩瘤状产出。由南、北两个小岩体组成。北岩体南倾, 南岩体北倾, 平面形态为长条状, 走向近 EW。单个岩体长约 20 km, 宽 0.2~4.5 km, 出露面积 35 km<sup>2</sup>。岩石类型以辉长岩、角闪辉长岩为主, 单辉橄榄岩、单辉辉石岩和橄榄辉长岩次之; 岩石普遍发育堆晶结构, 由底至顶, 依次为单辉橄榄岩→单辉辉石岩→辉长岩韵律层或辉石岩→辉长岩—角闪辉长岩的韵律。王国强等(2012) 获得辉长岩中锆石 U-Pb 年龄( $320.9 \pm 3.0$ ) Ma, 李奇祥等(2010) 获得辉长岩锆石 U-Pb 年龄为( $357.7 \pm 3.5$ ) Ma, 表明岩体为早石炭世中晚期岩浆活动的产物。

黑山基性—超基性岩体: 平面上呈“鸭梨”状, 剖面上呈上缓下陡的倒漏斗状, 向西南倾伏, 出露面积为 0.26 km<sup>2</sup>, 总体走向 310°, 长约 790 m, 宽约 180~520 m, 垂直深度超过 1000 m, 经重磁异常及钻孔控制, 其空间分布形态为一向下延伸长度大于走向长度, 向西南倾伏的岩柱状单斜岩体。岩体西、南、北侧与围岩呈断层接触, 东呈侵入接触, 局部超基性岩枝侵入到大理岩之中。黑山岩体是以斜长角闪橄榄岩为主的基性—超基性杂岩体, 主要岩石类型有方辉橄榄岩、橄榄岩、二辉橄榄岩、辉长岩。该岩体角闪橄榄岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为( $374.6 \pm 5.2$ ) Ma(杨建国等, 2012), 辉长岩锆石 ID-TIMS 年龄为( $356 \pm 0.6$ ) Ma~( $366 \pm 0.6$ ) Ma, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为( $357 \pm 4$ ) Ma, 为晚泥盆世(Xie et al., 2012)。

红柳沟基性—超基性岩体: 位于黑山基性—超基性



岩体西约 20 km 的红柳沟-大头山一带。岩体侵位于敦煌岩群中, 总体受方山口-庙庙井-双鹰山大断裂控制, NW 向分布。岩体以辉长岩为主, 出露面积 5~20 km<sup>2</sup>。基性岩为辉长岩, 主要有两期, 早期暗色辉长岩与晚期浅色辉长岩为侵入接触关系。超基性岩主要有橄榄角闪苏长岩、橄榄辉长苏长岩、辉石岩、二辉橄榄岩、方辉橄榄岩、辉橄岩、纯橄岩和蛇纹岩等, 其多呈小岩珠和岩脉产出, 岩相分异明显。谢燮等(2015)获得该岩体矿化橄榄角闪辉长苏长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (396.7±3.8) Ma, 属中泥盆世—晚泥盆世。

大山头南基性-超基性岩体: 岩体由辉长岩-橄榄苏长辉长岩和橄榄二辉岩-纯橄岩相组成, 铜镍矿化主要赋存于橄榄二辉岩-纯橄岩相中。王磊等(2015)采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年龄方法, 获得辉长岩年龄为 (374.3±3) Ma, 岩体与黑山岩体年龄一致, 形成于中晚泥盆世。

怪石山基性-超基性岩体: 出露长约 200 m, 宽 50~60 m, 平面形态似“棒槌”状。岩体走向 SE, 倾向 NE, 向 NW 侧伏。基性-超基性杂岩体地表出露面积较小, 仅 0.01 km<sup>2</sup>, 但岩相分异较好。自 NW 向 SE 可划分 5 个岩相(带): 伟晶状角闪辉长岩相→中粒辉长岩相→蚀变单辉辉石岩相→球形风化橄榄辉石岩相→含铜镍二辉橄榄岩相。其中, 中粒辉长岩相和橄榄辉石岩相构成怪石山岩体的主体, 铜镍矿体主要赋存于二辉橄榄岩相中, 矿体呈似层状、透镜状和不规则枝叉状“悬浮体”产于二辉橄榄岩中或呈浸染状产于其底部接触带部位。该岩体辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (358.6±3.9) Ma(杨建国等, 2016)。

成宣基性-超基性岩体(群): 位于北山造山带最南缘, 长约 13 km, 宽约 0.05~0.8 km, 由一系列大小不等的基性-超基性岩体(群)组成。岩体主要岩石类型有橄榄二辉岩、橄榄辉长岩、角闪辉长岩、辉长岩和闪长岩, 其中角闪辉长岩是主要的含矿岩性。刘聪(2024)获得该岩体辉长岩和橄榄二辉岩锆石 U-Pb 年龄分别为 (291.1±1.6) Ma 和 (284.6±5.8) Ma, 表明岩体形成于早二叠世。

大敖包沟基性-超基性岩体: 岩体位于阿尔金断裂北侧敦煌地块内, 区内断裂构造发育, 呈岩墙、岩脉状产出。岩体由辉长岩相、辉石岩相和橄榄辉石岩相组成, 各岩相界线不明显, 呈渐变过渡关系, 铜镍矿体主要赋存在橄榄辉石岩相和辉石岩相中。康鸿杰等

(2024)获得大敖包沟辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年为 (331.7±7.3) Ma, 表明岩体侵位时代为石炭纪早期。

## 1.2 甘肃省铜镍硫化物矿床成矿地质条件

截至 2022 年底, 甘肃省共发现镍矿产地 17 处, 其中超大型铜镍矿床 1 处、中型铜镍矿床 1 处、铜镍矿产地或矿点 15 处。累计查明镍资源储量 642 万 t, 保有 351.44 万 t, 其中金川累计查明镍资源储量 624.98 万 t、保有 329.36 万 t(王学银等, 2017)。矿床类型均为岩浆熔离型铜镍矿床。近年来, 在甘肃北山的成宣、铭杨、怪石山, 阿尔金山的加尔玛萨依、大敖包沟, 祁连山的红川等地区铜镍找矿勘查取得了一定进展。笔者选择了龙首山、北山、阿尔金山-祁连山地区典型含矿基性-超基性岩体岩石地球化学特征分析研究其成矿地质条件。

### 1.2.1 龙首山地区

龙首山地区发现的基性-超基性岩体形成时代多为新元古代, 少数形成于晚古生代, 主要分布于藏布台-金川、小口子-大口子和北海子一带, 岩体多呈岩墙、岩脉、岩株状产出。岩性为橄榄辉石岩、二辉橄榄岩、含辉橄榄岩及纯橄岩等。目前发现金川超大型铜镍矿床, 北海子等铜镍矿点 6 处(图 3)。

#### 1.2.1.1 岩石化学与地球化学特征

本次对金川岩体进行采样分析, 分析结果及主要参数见表 1、表 2、表 3。从表中可以看出, 龙首山地区超基性岩体具有高 MgO, 低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO 特征,  $\sigma$  值介于 0.01~1.27, 属钙碱性系列, A/NCK 值 0.49~3.32, 在 Ol'-Ne'-Q' 与 AFM 图解(图 4)投影于亚碱性区, 在 AFM 图上全都投影在拉斑玄武岩系列, 表明岩石应属于拉斑玄武岩系列。

岩石稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )为  $10.16 \times 10^{-6} \sim 37.59 \times 10^{-6}$ ,  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 1.0 \sim 3.6$ ,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.2 \sim 1.8$ ,  $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{N}} = 2.0 \sim 9.0$ , 稀土配分曲线右倾(图 5a), 轻稀土富集且无明显 Eu 异常。微量元素蛛网图(图 5b)显示具有 Nb、Ta 负异常明显, Th/Nb、Th/Ta 值较原始地幔值高。

金川基性-超基性岩体形成于新元古代, 结合岩石地球化学特征和区域构造背景分析, 认为其构造环境为与大陆裂谷伸展环境。

### 1.2.2 北山地区

北山地区目前发现的含矿基性-超基性岩体主要集中在晚泥盆和早二叠世(图 6), 含矿岩体多分异良好, 赋矿岩石主要有斜长方辉橄榄岩、橄榄岩、角闪橄榄岩、蛇纹石化橄榄岩、橄榄角闪辉长岩和黑云母

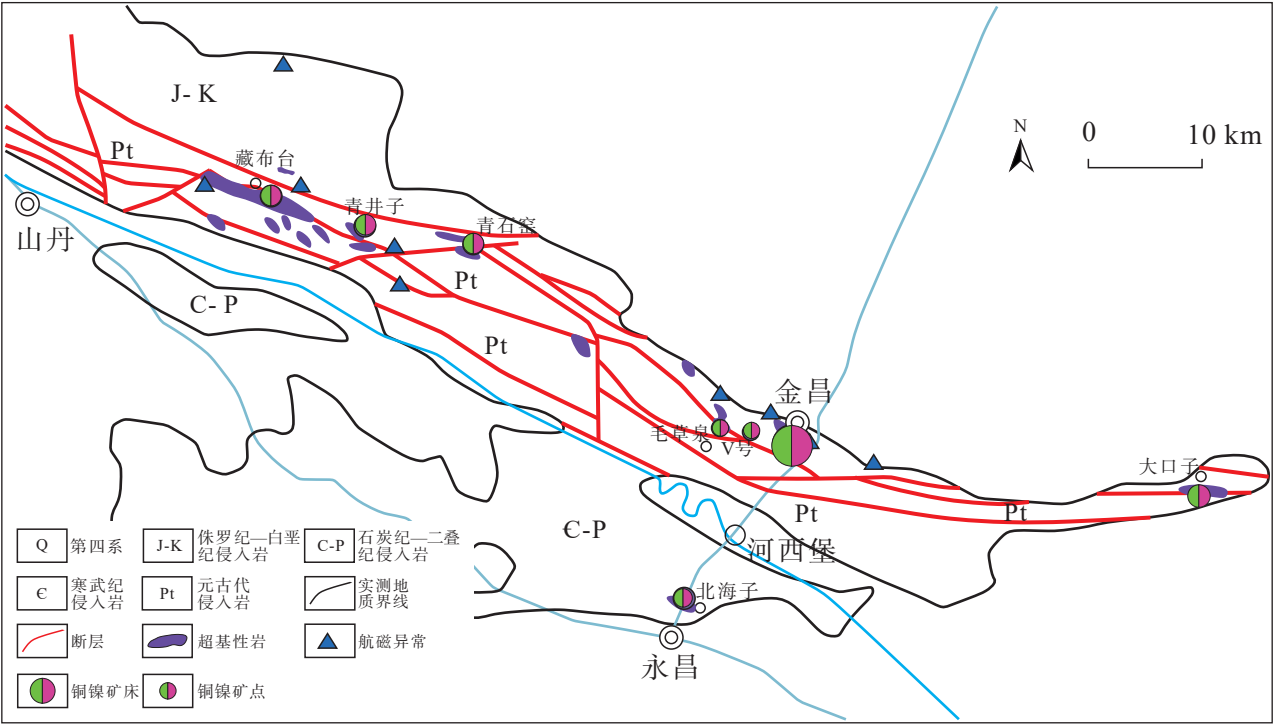


图3 龙首山基性-超基性岩与铜镍矿分布图

Fig. 3 The distribution of basic-ultrabasic rocks and copper-nickel deposits in Longshou Mountain

表 1 龙首山超基性岩岩石化学成分及参数表

Tab. 1 Chemical composition and parameters of ultrabasic rocks in Longshou Mountain

| 样号        | 岩石名称            | 产地     | 氧化物含量 (%)        |       |                                |                                |      |      |                  |                   |                  |      |                               |       |       | 特征参数 |       |       |      |      |       |         |        |
|-----------|-----------------|--------|------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------------------|-------------------|------------------|------|-------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|---------|--------|
|           |                 |        | SiO <sub>2</sub> | MgO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO  | CaO  | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | MnO  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | LOI   | 总和    | A.R  | MF    | FL    | SI   | σ    | A/CNK | R1      | R2     |
| LZK265-13 | 二辉橄<br>榄岩       | 金<br>川 | 38.38            | 27.81 | 2.20                           | 16.17                          | -    | 3.93 | 0.22             | 0.3               | 0.22             | 0.13 | 0.03                          | 8.86  | 89.39 | 1.19 | 98.66 | 11.68 | 1.30 | 0.06 | 0.49  | 1305.30 | 474.90 |
| LZK265-17 | 二辉岩             |        | 42.24            | 25.63 | 5.56                           | 14.59                          | -    | 4.60 | 0.52             | 0.77              | 0.37             | 0.18 | 0.05                          | 4.50  | 94.50 | 1.25 | 96.56 | 19.85 | 3.20 | 1.70 | 0.97  | 1493.20 | 627.50 |
| L05U-01   | 二辉橄<br>榄岩       |        | 37.25            | 30.56 | 2.71                           | 11.99                          | -    | 2.91 | 0.68             | 0.06              | 0.22             | 0.17 | 0.03                          | 12.17 | 86.58 | 1.10 | 94.63 | 8.78  | 5.25 | 0.01 | 0.85  | 1322.00 | 398.28 |
| L07U-16   | 橄<br>榄岩         |        | 36.22            | 32.29 | 2.31                           | 16.21                          | -    | 1.05 | 0.23             | 0.07              | 0.26             | 0.16 | 0.04                          | 9.64  | 88.84 | 1.22 | 98.60 | 23.86 | 1.37 | 0.02 | 1.67  | 1087.80 | 169.38 |
| L24U-04   | 橄<br>榄辉<br>石岩   |        | 38.88            | 29.72 | 2.84                           | 13.40                          | -    | 3.74 | 0.12             | 0.12              | 0.27             | 0.12 | 0.03                          | 9.39  | 89.24 | 1.13 | 99.11 | 9.45  | 0.86 | 0.04 | 0.69  | 1384.40 | 461.57 |
| LB(05)-1  | 橄<br>榄岩         |        | 36.95            | 33.59 | 3.42                           | 12.47                          | -    | 2.76 | 0.83             | 0.21              | 0.27             | 0.13 | 0.04                          | 8.77  | 90.68 | 1.17 | 93.76 | 14.80 | 6.02 | 0.04 | 1.06  | 1161.30 | 404.05 |
| R32B-11   | 含辉橄<br>榄岩       |        | 34.92            | 36.98 | 1.42                           | 13.96                          | -    | 0.29 | 0.09             | 0.04              | 0.14             | 0.16 | 0.03                          | 11.90 | 88.03 | 1.24 | 99.36 | 38.10 | 0.63 | 0.00 | 3.00  | 989.82  | 63.53  |
| R32B-12   | 方辉橄<br>榄岩       |        | 35.77            | 35.00 | 1.44                           | 14.44                          | -    | 0.20 | 0.11             | 0.04              | 0.19             | 0.18 | 0.04                          | 12.67 | 87.41 | 1.33 | 99.24 | 53.19 | 0.74 | 0.01 | 3.32  | 1066.20 | 55.261 |
| Y22U-06   | 含长二<br>辉橄<br>榄岩 |        | 36.29            | 30.24 | 3.45                           | 17.18                          | -    | 2.17 | 0.29             | 0.48              | 0.28             | 0.16 | 0.04                          | 8.14  | 90.59 | 1.31 | 98.34 | 25.92 | 1.59 | 0.09 | 1.18  | 1016.70 | 314.50 |
| Y13U-05   | 单辉橄<br>榄岩       |        | 36.42            | 29.27 | 3.77                           | 16.68                          | -    | 2.29 | 0.12             | 0.17              | 0.15             | 0.15 | 0.03                          | 9.15  | 89.05 | 1.11 | 99.27 | 12.26 | 0.70 | 0.02 | 1.45  | 1180.70 | 324.97 |
| mcq-15    | 蚀变辉<br>石岩       |        | 43.48            | 24.83 | 6.09                           | 4.70                           | 6.05 | 5.56 | 0.01             | 0.21              | 0.57             | 0.13 | 0.27                          | 7.50  | 91.90 | 1.14 | 99.91 | 12.30 | 0.09 | 1.27 | 0.96  | 1735.10 | 714.82 |
| mcq-2     | 蚀变橄<br>榄辉<br>石岩 |        | 47.42            | 24.20 | 7.63                           | 2.28                           | 8.52 | 5.88 | 0.17             | 0.58              | 0.37             | 0.16 | 0.04                          | 1.37  | 97.25 | 1.15 | 98.45 | 13.91 | 1.43 | 0.20 | 1.12  | 1989.60 | 787.20 |

表 2 龙首山超基性岩稀土元素含量及各类参数

Tab. 2 Rare earth element content and various parameters of ultrabasic rocks in Longshou Mountain

| 样号        | 岩石名称        | 产地 | 元素含量 (10 <sup>-6</sup> ) |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 特征参数  |       |       |           |      |      |                      |                      |                      |
|-----------|-------------|----|--------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-----------|------|------|----------------------|----------------------|----------------------|
|           |             |    | La                       | Ce    | Pr   | Nd   | Sm   | Eu   | Gd   | Tb   | Dy   | Ho   | Er   | Tm   | Yb   | Lu   | ΣREE  | ΣLREE | ΣHREE | LREE/HREE | δEu  | δCe  | (La/Yb) <sub>N</sub> | (La/Sm) <sub>N</sub> | (Ce/Yb) <sub>N</sub> |
| LZK265-13 | 二辉橄榄岩       |    | 1.87                     | 4.44  | 0.59 | 2.55 | 0.69 | 0.22 | 0.67 | 0.12 | 0.7  | 0.14 | 0.41 | 0.06 | 0.37 | 0.06 | 12.89 | 10.36 | 2.53  | 4.09      | 0.99 | 1.04 | 3.41                 | 1.34                 | 4.10                 |
| LZK265-17 | 二辉岩         |    | 8.17                     | 14.1  | 1.74 | 6.71 | 1.49 | 0.47 | 1.4  | 0.23 | 1.34 | 0.27 | 0.78 | 0.1  | 0.69 | 0.1  | 37.59 | 32.68 | 4.91  | 6.66      | 0.99 | 0.92 | 7.98                 | 2.71                 | 6.98                 |
| L05U-01   | 二辉橄榄岩       |    | 2.49                     | 5.23  | 0.73 | 2.96 | 0.7  | 0.24 | 0.68 | 0.11 | 0.64 | 0.13 | 0.36 | 0.05 | 0.36 | 0.06 | 14.74 | 12.35 | 2.39  | 5.17      | 1.06 | 0.95 | 4.66                 | 1.76                 | 4.96                 |
| L07U-16   | 橄榄岩         |    | 3.27                     | 6.68  | 0.94 | 3.98 | 0.96 | 0.27 | 0.88 | 0.14 | 0.86 | 0.17 | 0.5  | 0.07 | 0.45 | 0.07 | 19.24 | 16.10 | 3.14  | 5.13      | 0.90 | 0.93 | 4.90                 | 1.68                 | 5.07                 |
| L24U-04   | 橄榄辉石岩       |    | 1.42                     | 4.1   | 0.64 | 2.94 | 0.88 | 0.23 | 0.83 | 0.15 | 0.89 | 0.18 | 0.5  | 0.07 | 0.49 | 0.07 | 13.39 | 10.21 | 3.18  | 3.21      | 0.82 | 1.05 | 1.95                 | 0.80                 | 2.86                 |
| LB(05)-1  | 橄榄岩         |    | 1.57                     | 4.7   | 0.88 | 4.41 | 1.11 | 0.23 | 0.88 | 0.14 | 0.82 | 0.15 | 0.46 | 0.06 | 0.43 | 0.06 | 15.90 | 12.90 | 3.00  | 4.30      | 0.71 | 0.98 | 2.46                 | 0.70                 | 3.73                 |
| R32B-11   | 含辉橄榄岩       | 金川 | 1.62                     | 3.61  | 0.53 | 2.3  | 0.52 | 0.14 | 0.47 | 0.08 | 0.44 | 0.09 | 0.26 | 0.05 | 0.24 | 0.05 | 10.40 | 8.72  | 1.68  | 5.19      | 0.87 | 0.96 | 4.55                 | 1.54                 | 5.14                 |
| R32B-12   | 方辉橄榄岩       |    | 3.32                     | 5.93  | 0.76 | 3.06 | 0.68 | 0.16 | 0.61 | 0.1  | 0.57 | 0.11 | 0.31 | 0.05 | 0.28 | 0.05 | 15.99 | 13.91 | 2.08  | 6.69      | 0.76 | 0.92 | 7.99                 | 2.41                 | 7.23                 |
| Y22U-06   | 含长二辉<br>橄榄岩 |    | 3.8                      | 7.79  | 1.09 | 4.5  | 1.04 | 0.34 | 0.97 | 0.16 | 0.93 | 0.19 | 0.52 | 0.07 | 0.49 | 0.07 | 21.96 | 18.56 | 3.40  | 5.46      | 1.03 | 0.94 | 5.23                 | 1.80                 | 5.43                 |
| Y13U-05   | 单辉橄榄岩       |    | 1.63                     | 3.06  | 0.45 | 2.04 | 0.55 | 0.2  | 0.56 | 0.09 | 0.61 | 0.12 | 0.37 | 0.05 | 0.37 | 0.06 | 10.16 | 7.93  | 2.23  | 3.56      | 1.10 | 0.88 | 2.97                 | 1.46                 | 2.82                 |
| mcq-15    | 蚀变辉石岩       |    | 4.55                     | 9.85  | 1.28 | 5.01 | 1.26 | 0.16 | 1.49 | 0.25 | 1.59 | 0.33 | 0.97 | 0.14 | 0.91 | 0.13 | 27.92 | 22.11 | 5.81  | 3.81      | 0.36 | 1.00 | 3.37                 | 1.78                 | 3.70                 |
| mcq-2     | 蚀变橄榄<br>辉石岩 |    | 5.31                     | 11.54 | 1.4  | 6.14 | 1.55 | 0.49 | 1.86 | 0.33 | 2.01 | 0.42 | 1.1  | 0.17 | 1.08 | 0.17 | 33.57 | 26.43 | 7.14  | 3.70      | 0.88 | 1.04 | 3.31                 | 1.69                 | 3.65                 |

表 3 龙首山超基性岩微量元素含量及各类参数

Tab. 3 Trace element content and various parameters of ultrabasic rocks in Longshou Mountain

| 样号        | 岩石名称    | 产地 | 元素含量 (10 <sup>-6</sup> ) |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |      |       |       | 特征参数  |      |       |
|-----------|---------|----|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|
|           |         |    | Y                        | Hf    | Zr    | V     | Sc    | Cr    | Co   | Ni    | Cu    | Nb    | Ba    | Ta    | Pb   | Th    | U     | Hf/Th | Zr/Y | Hf/Ta |
| LZK265-17 | 二辉橄榄岩   | 金川 | 7.2                      | 0.96  | 38.9  | 62.2  | 17.9  | 2 574 | 148  | 2 362 | 1 118 | 1.85  | 153   | 0.15  | 16.7 | 0.79  | 0.16  | 1.22  | 5.40 | 6.4   |
| L05U-01   | 二辉岩     |    | 3.6                      | 0.67  | 27.1  | 34.8  | 8.02  | 3 417 | 106  | 1 276 | 552   | 0.91  | 92.3  | 0.07  | 7.65 | 0.34  | 0.11  | 1.97  | 7.53 | 9.57  |
| L07U-16   | 二辉橄榄岩   |    | 4.82                     | 0.74  | 30.9  | 43    | 9.32  | 3 976 | 192  | 4 317 | 2 220 | 1.41  | 16.8  | 0.09  | 18.5 | 0.32  | 0.08  | 2.31  | 6.41 | 8.22  |
| L24U-04   | 橄榄岩     |    | 4.95                     | 0.93  | 33.9  | 49.3  | 15.4  | 3 185 | 152  | 4 039 | 2 335 | 1.06  | 6.07  | 0.07  | 8.74 | 0.41  | 0.09  | 2.27  | 6.85 | 13.29 |
| LB(05)-1  | 橄榄辉石岩   |    | 4.49                     | 0.69  | 28.1  | 31.8  | 7.21  | 3 570 | 152  | 2 574 | 989   | 1.54  | 90.5  | 0.11  | 7.16 | 1.05  | 0.18  | 0.66  | 6.26 | 6.27  |
| R32B-11   | 橄榄岩     |    | 2.47                     | 0.46  | 20.8  | 15.6  | 6.42  | 3 663 | 134  | 1 203 | 59.9  | 0.77  | 9.22  | 0.05  | 6.09 | 0.17  | 0.06  | 2.71  | 8.42 | 9.20  |
| R32B-12   | 含辉橄榄岩   |    | 3.09                     | 0.69  | 30.6  | 15.3  | 6.86  | 2 944 | 140  | 1 399 | 80.6  | 1.1   | 9.02  | 0.07  | 6.15 | 0.24  | 0.07  | 2.88  | 9.90 | 9.86  |
| Y22U-06   | 方辉橄榄岩   |    | 5.17                     | 0.72  | 29.6  | 34.8  | 10.4  | 2 922 | 254  | 6 790 | 1 640 | 1.6   | 285   | 0.1   | 16.6 | 0.41  | 0.09  | 1.76  | 5.73 | 7.2   |
| Y13U-05   | 含长二辉橄榄岩 |    | 3.64                     | 0.52  | 20.2  | 32.3  | 9.88  | 3 198 | 252  | 7 199 | 2 381 | 0.45  | 34.1  | 0.07  | 11.8 | 0.23  | 0.05  | 2.26  | 5.55 | 7.43  |
| mcq-15    | 单辉橄榄岩   |    | 8.94                     | 0.854 | 24.3  | 139.8 | 17.1  | 4 501 | 93.8 | 1 525 | 38.1  | 2.041 | 15.21 | 0.319 | 2.99 | 1.317 | 1.015 | 0.65  | 2.72 | 2.68  |
| mcq-2     | 蚀变辉石岩   |    | 10.85                    | 1.233 | 39.42 | 125   | 17.99 | 2 565 | 92   | 1 539 | 75.34 | 1.7   | 9.361 | 0.167 | 3.3  | 1.625 | 0.55  | 0.76  | 3.63 | 7.38  |

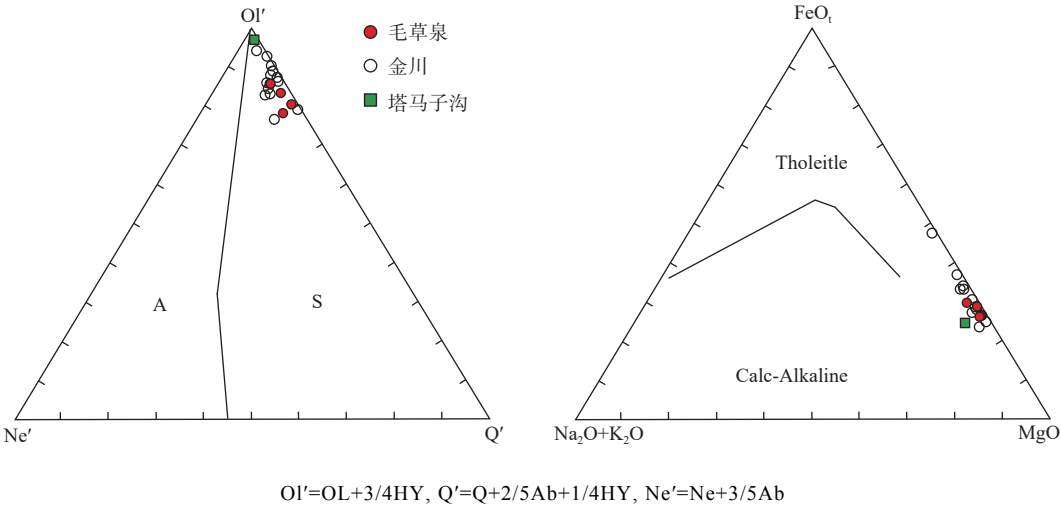


图4 超镁铁岩 Ol'-Ne'-Q'与 AFM 图

Fig. 4 Ol'-Ne'-Q' and AFM diagrams for ultramafic rocks.

长英质角岩。

1.2.2.1 泥盆世基性-超基性岩

笔者对北山地区黑山泥盆纪基性-超基性岩体进行了采样分析(表 4)。岩石中含矿基性岩化学成分平均值相当于角闪辉长岩,超基性岩化学成分平均值相当于角闪橄榄岩(黎彤等, 1976)。岩石碱度指数 σ 值

介于 0.002~0.228, 平均为 0.05, Na<sub>2</sub>O>K<sub>2</sub>O。原始岩浆具橄榄拉斑玄武岩性质, 镁铁比值 4.79~5.86, 属铁质系列。

1.2.2.2 北山地区二叠世基性-超基性岩

二叠纪是北山南带重要的铜镍成矿期, 成宣等含铜镍基性-超基性岩即属该期次侵入岩。区域上二叠



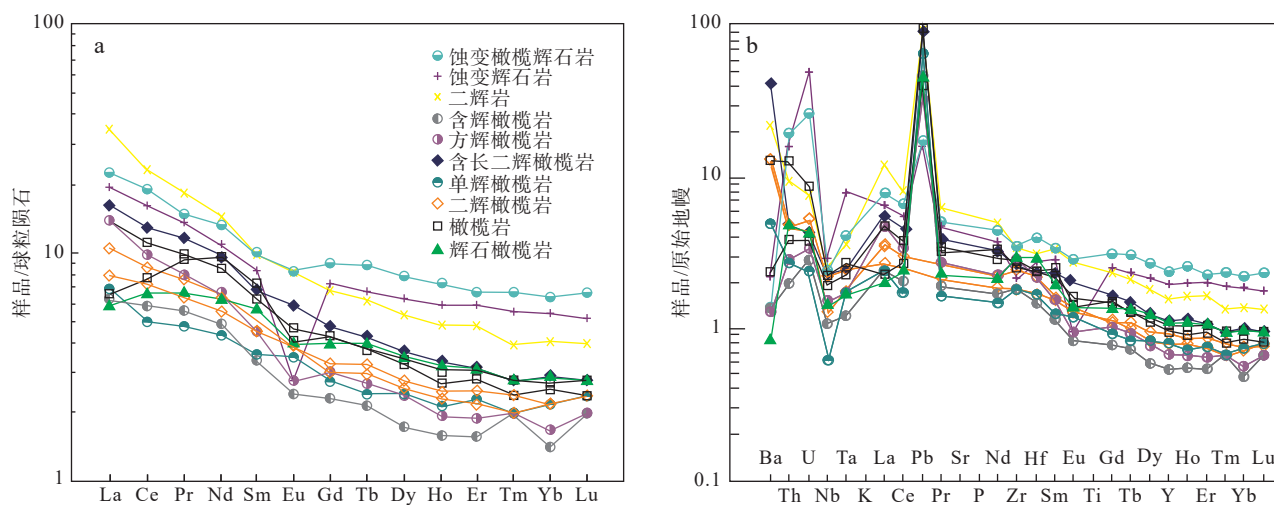
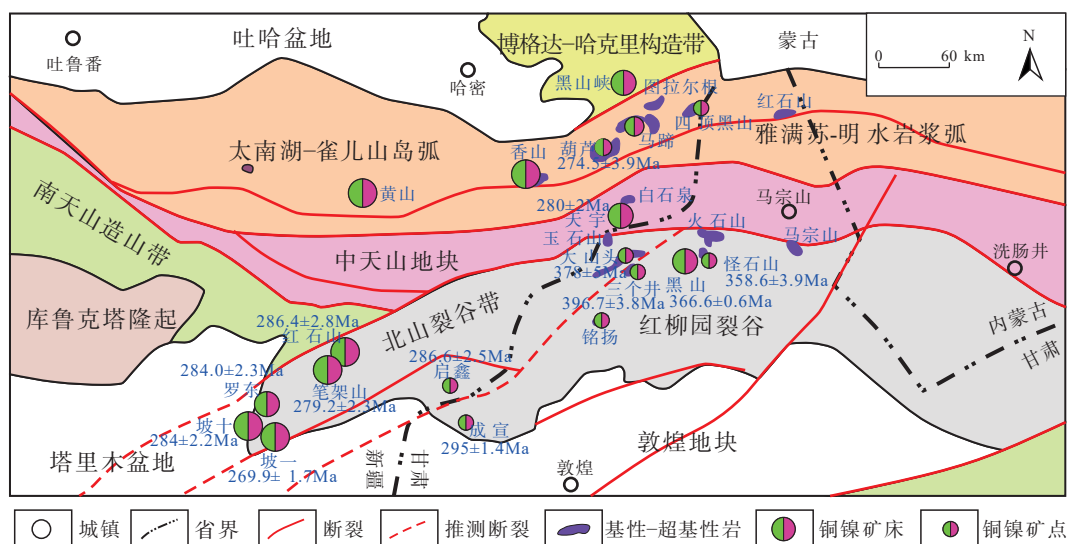


图5 岩体稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 5 (a) Chondrite-normalized rare earth element (REE) partition diagram and (b) primitive mantle-normalized trace element spider diagram for ultrabasic rocks



年龄数据来自 Qin 等(2011)、Tang 等(2011)、Xie 等(2012)、Su 等(2012)、Xue 等(2016a, 2016b, 2019)、赵斌斌等(2024)

图6 北山地区基性-超基性岩与铜镍矿分布图(据卜鹏等, 2018 修改)

Fig. 6 Distribution map of basic-ultrabasic rocks and copper-nickel deposits in the Beishan region

世侵入岩以伸展构造环境岩浆侵入作用为主(毛景文等, 2002; 李文渊等, 2019; 宋谢炎等, 2019), 岩石类型有橄榄二辉岩、含长橄榄二辉岩、辉石橄榄岩、橄榄辉长岩、角闪辉长岩、辉长苏长岩和辉长岩等岩石组合。含矿岩石具单斜辉石岩-辉长岩组合; 岩石粒度变化一般较大, 含铜镍矿化岩相富斜方辉石。岩体形态均呈脉状、透镜状、岩墙状, 含矿岩体具蛇纹岩→橄榄辉石岩→辉石橄榄岩组合, 岩石富 K、Al, 稀土总量偏高, 相对富集轻稀土特征。

对北山成宣地区二叠纪基性-超基性岩体进行了

采样分析, 结果见表 5、表 6、表 7。从表中可以看出含矿岩石中  $\text{SiO}_2$  含量为 42.41%~43.42%,  $\text{MgO}$  含量 18.23%~20.20%,  $\text{TiO}_2$  含量为 0.32%~0.35%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 12.51%~13.54%, 高于原始地幔(3.22%~4.88%), 反映原始岩浆同化混染程度较高。 $m/f$  值为 3.10~3.27, 平均值为 3.18, 属于铁质超基性岩。

稀土总量  $\Sigma\text{REE}=114.22\times10^{-6}\sim128.45\times10^{-6}$ ;  $\text{LREE}/\text{HREE}=10.71\sim11.19$ ;  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=10.57\sim16.39$ ;  $\delta\text{Eu}=0.82\sim1.12$ 。球粒陨石标准化 REE 配分曲线右倾, 轻稀土富集, 轻重稀土分异明显(图 7), 无铈异常。在微量元

表 4 黑山泥盆世基性-超基性岩石化学特征表  
Tab. 4 Chemical characteristics of Heishan Devonian basic-ultrabasic rocks.

| 样号    | 岩石类型        | 化学成分(%)          |                  |                                |                                |       |      |       |       |                  |                   |
|-------|-------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------|-------|------------------|-------------------|
|       |             | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO   | MnO  | CaO   | MgO   | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O |
| ZH002 | 中细粒斜长角闪辉橄岩  | 40.99            | 0.50             | 5.68                           | 13.46                          | 9.34  | 0.16 | 3.42  | 28.32 | 0.36             | 0.84              |
| ZH015 |             | 42.64            | 0.42             | 5.50                           | 11.71                          | 8.14  | 0.16 | 3.01  | 29.43 | 0.37             | 0.74              |
| ZH022 |             | 42.02            | 0.67             | 7.84                           | 12.55                          | 8.06  | 0.14 | 3.86  | 20.92 | 0.96             | 1.08              |
| ZH028 |             | 41.54            | 0.16             | 2.26                           | 12.68                          | 9.68  | 0.18 | 1.29  | 39.36 | 0.16             | 0.40              |
| YQ-2  | 中细粒角闪辉长岩    | 60.64            | 0.83             | 14.61                          | 1.56                           | 4.72  | 0.20 | 1.20  | 1.72  | 0.45             | 8.00              |
| YQ-6  |             | 51.73            | 0.60             | 16.24                          | 2.63                           | 3.98  | 0.21 | 4.03  | 7.32  | 1.70             | 1.85              |
| YQ-11 |             | 50.79            | 1.09             | 16.19                          | 3.78                           | 2.17  | 0.11 | 8.93  | 9.65  | 1.00             | 3.20              |
| YQ-1  |             | 49.33            | 0.70             | 11.31                          | 1.17                           | 6.26  | 0.25 | 10.65 | 8.73  | 0.45             | 2.20              |
| YQ-13 | 中细粒橄榄角闪辉长岩  | 49.79            | 0.54             | 10.68                          | 4.88                           | 3.50  | 0.16 | 9.38  | 8.30  | 0.73             | 2.60              |
| YQ-4  |             | 41.53            | 0.28             | 6.04                           | 4.80                           | 6.02  | 0.25 | 7.95  | 16.33 | 0.35             | 1.48              |
| YQ-5  |             | 38.11            | 0.13             | 5.73                           | 4.81                           | 6.36  | 0.28 | 9.98  | 16.98 | 0.15             | 0.90              |
| YQ-10 |             | 42.26            | 0.37             | 6.25                           | 3.88                           | 6.82  | 0.29 | 3.08  | 29.30 | 0.13             | 0.43              |
| YQ-14 | 中粗粒含长角闪橄橄榄岩 | 43.66            | 0.43             | 7.94                           | 2.94                           | 6.24  | 0.15 | 5.18  | 30.13 | 0.05             | 0.43              |
| KQ-4  |             | 38.63            | 0.22             | 3.54                           | 4.00                           | 8.96  | 0.19 | 3.75  | 29.81 | 0.20             | 0.68              |
| KQ-6  |             | 36.54            | 0.16             | 2.45                           | 6.15                           | 5.16  | 0.18 | 4.20  | 24.71 | 0.75             | 0.95              |
| KQ-7  |             | 40.39            | 0.31             | 4.90                           | 2.96                           | 10.40 | 0.19 | 2.61  | 34.69 | 0.18             | 0.33              |
| YQ-9  | 角闪橄橄榄岩      | 41.24            | 0.25             | 3.69                           | 2.37                           | 8.48  | 0.30 | 1.98  | 35.71 | 0.18             | 0.20              |
| YQ-3  |             | 37.67            | 0.19             | 3.60                           | 7.84                           | 3.80  | 0.24 | 3.07  | 31.57 | 0.28             | 0.63              |
| YQ-16 |             | 41.14            | 0.21             | 4.47                           | 1.11                           | 11.04 | 0.21 | 2.40  | 35.90 | 0.05             | 0.43              |
| YQ-17 |             | 41.64            | 0.39             | 6.48                           | 2.38                           | 9.04  | 0.19 | 0.98  | 33.58 | 0.05             | 0.10              |
| YQ-15 | 单辉橄橄榄岩      | 40.46            | 0.28             | 5.99                           | 1.54                           | 9.68  | 0.19 | 2.10  | 33.72 | 0.18             | 0.53              |
| KQ-5  | 斜长角闪橄橄榄岩    | 40.56            | 0.46             | 7.20                           | 5.00                           | 10.08 | 0.18 | 3.08  | 27.89 | 0.33             | 0.63              |

表 5 成宣二叠世基性-超基性岩主量元素含量(%)及特征表  
Tab. 5 Major element content (%) and characteristics of of the Chenxuan Permian basic-ultrabasic rocks

| 岩石名称   | SiO <sub>2</sub> | Na <sub>2</sub> O | MgO                            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO  |
|--------|------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------|------|
| 辉石橄橄榄岩 | 42.33            | 1.89              | 19.25                          | 13.37                          | 0.10                          | 0.58             | 6.91 |
| 橄橄榄辉石岩 | 43.42            | 1.95              | 20.20                          | 12.51                          | 0.08                          | 0.29             | 6.55 |
| 辉石橄橄榄岩 | 42.41            | 2.05              | 18.23                          | 13.54                          | 0.09                          | 0.90             | 6.77 |
| 岩石名称   | TiO <sub>2</sub> | MnO               | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO                            | LOI                           | Mg <sup>#</sup>  | m/f  |
| 辉石橄橄榄岩 | 0.35             | 0.05              | 1.92                           | 8.92                           | 2.47                          | 0.76             | 3.27 |
| 橄橄榄辉石岩 | 0.32             | 0.06              | 2.19                           | 8.19                           | 2.22                          | 0.78             | 3.18 |
| 辉石橄橄榄岩 | 0.34             | 0.05              | 1.82                           | 7.82                           | 1.22                          | 0.77             | 3.10 |

素原始地幔标准化配分曲线图上(图 7b), Rb、Ba、U、Th 等元素富集, 稀土元素、Zr、Hf、Lu 等元素相对亏损。

1.2.3 阿尔金-祁连西段地区

阿尔金-祁连西段基性-超基性岩体主要形成于

早古生代, 个别形成于新元古代, 多为镁质超基性岩, 属于蛇绿混杂岩。已发现大敖包沟、红川、加尔玛萨依铜镍矿(图 8)。含矿岩体多呈岩墙、岩脉、岩株产出, 受阿尔金走滑断裂和祁连造山运动影响, 岩体后

表 6 成宣二叠世基性-超基性岩微量元素( $10^{-6}$ )特征表

Tab. 6 Trace element( $10^{-6}$ ) characteristics of the Chenxuan Permian basic-ultrabasic rocks

| 样号    | 岩石名称  | Rb   | K     | Ba    | Th   | U    | Nb    | La   | Ce   | Sr    |
|-------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|------|------|-------|
| YSQ-1 | 辉石橄榄岩 | 129  | 5 036 | 1 340 | 17.9 | 4.4  | 12.6  | 28   | 53.7 | 661   |
| YSQ-2 | 橄榄辉石岩 | 178  | 2 534 | 1 610 | 18.5 | 4    | 11.8  | 24.6 | 48.1 | 514   |
| YSQ-3 | 辉石橄榄岩 | 116  | 7 971 | 1 590 | 15.5 | 3.12 | 11    | 22.6 | 49.1 | 632   |
| 样号    | 岩石名称  | Nd   | P     | Zr    | Hf   | Sm   | Ti    | Y    | Yb   | Lu    |
| YSQ-1 | 辉石橄榄岩 | 24   | 459   | 135   | 3.8  | 4.54 | 2 210 | 14.4 | 1.38 | 0.216 |
| YSQ-2 | 橄榄辉石岩 | 21.3 | 349   | 114   | 3.33 | 4.06 | 2010  | 12.9 | 1.24 | 0.193 |
| YSQ-3 | 辉石橄榄岩 | 22.9 | 423   | 98    | 2.78 | 4.39 | 2 170 | 13.9 | 1.26 | 0.183 |

表 7 成宣二叠世镁铁-超镁铁岩稀土元素含量( $10^{-6}$ )特征表

Tab. 7 Rare earth element (REE)( $10^{-6}$ ) content characteristics of the Chenxuan Permian basic-ultrabasic rocks

| 样号    | 岩石名称  | La           | Ce    | Pr    | Nd        | Sm                   | Eu          | Gd          | Tb   |
|-------|-------|--------------|-------|-------|-----------|----------------------|-------------|-------------|------|
| YSQ-1 | 辉石橄榄岩 | 28           | 53.7  | 6.37  | 24        | 4.54                 | 1.26        | 3.66        | 0.52 |
| YSQ-2 | 橄榄辉石岩 | 24.6         | 48.1  | 5.65  | 21.3      | 4.06                 | 1.14        | 3.16        | 0.47 |
| YSQ-3 | 辉石橄榄岩 | 22.6         | 49.1  | 5.94  | 22.9      | 4.39                 | 1.18        | 3.44        | 0.50 |
| 样号    | 岩石名称  | Dy           | Ho    | Er    | Tm        | Yb                   | Lu          | Y           | —    |
| YSQ-1 | 辉石橄榄岩 | 2.64         | 0.51  | 1.43  | 0.217     | 1.38                 | 0.216       | 14.4        | —    |
| YSQ-2 | 橄榄辉石岩 | 2.35         | 0.46  | 1.3   | 0.192     | 1.24                 | 0.193       | 12.9        | —    |
| YSQ-3 | 辉石橄榄岩 | 2.49         | 0.47  | 1.37  | 0.194     | 1.26                 | 0.183       | 13.9        | —    |
| 样号    | 岩石名称  | $\Sigma$ REE | LREE  | HREE  | LREE/HREE | (La/Yb) <sub>N</sub> | $\delta$ Eu | $\delta$ Ce |      |
| YSQ-1 | 辉石橄榄岩 | 128.5        | 117.9 | 10.58 | 11.14     | 14.55                | 0.94        | 0.99        |      |
| YSQ-2 | 橄榄辉石岩 | 114.2        | 104.9 | 9.37  | 11.19     | 14.23                | 0.97        | 1.00        |      |
| YSQ-3 | 辉石橄榄岩 | 116.0        | 106.1 | 9.91  | 10.71     | 12.87                | 0.93        | 1.04        |      |

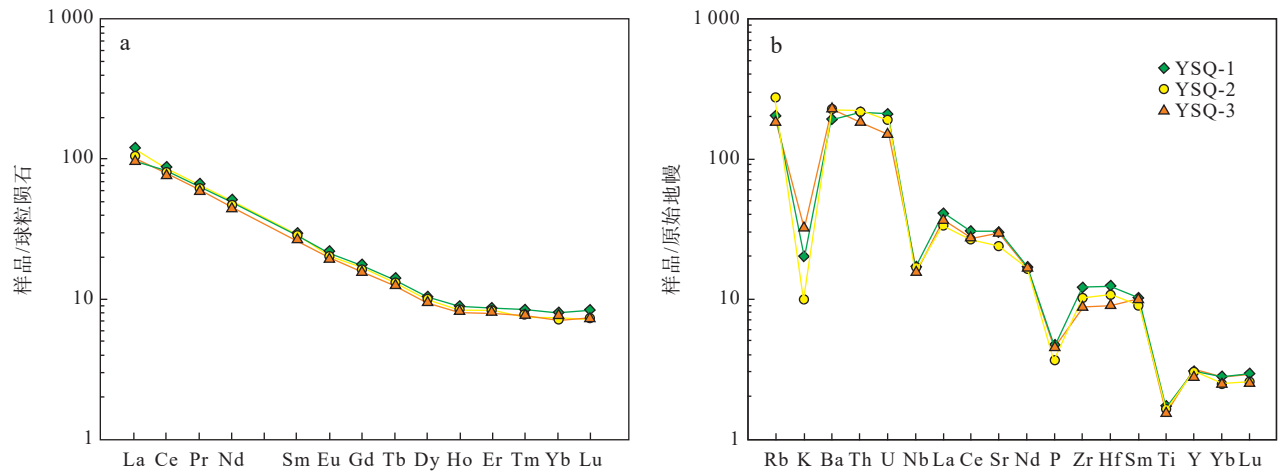


图7 成宣基性-超基性岩体稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 7 (a) Chondrite-normalized rare earth element (REE) partition diagram and (b) primitive mantle-normalized trace element spider diagram of the Chenxuan basic-ultrabasic rocks

期蚀变、变形强烈,赋矿岩体多为辉长岩、橄榄辉石岩、辉石岩组合,分异良好。

本次对北祁连西段大敖包沟基性-超基性岩体进行了采样分析,结果见表 8、表 9。从表中可以看出,岩体中 SiO<sub>2</sub> 含量介于 44.2%~49.1%,且 K<sub>2</sub>O>Na<sub>2</sub>O, MgO 含量为 14.53%~44.38%, FeO 含量为 15.25%~19.91%,碱度类型属极强太平洋型;岩石 m/f 值为 1.73~6.10,平均 4.05,属于铁质基性-超基性岩类。

岩体稀土元素总量 $\Sigma$ REE 为  $28.23\times 10^{-6}\sim 45.87\times 10^{-6}$ ,平均  $34.91\times 10^{-6}$ , LREE/HREE 为 3.05~8.64, (La/Yb)<sub>N</sub> 为 2.56~10.06,稀土元素配分曲线轻微右倾(图 9a),属轻稀土富集模式, Eu 异常不明显( $\delta$ Eu 为 0.76~1.06)。

原始地幔标准化的微量元素蛛网图上(图 9b),大离子亲石元素(Rb、Ba、K、Sr)、LREE 和高场强元素 U、Pb 相对富集,高场强元素(Zr、Hf、Nb、Ta)

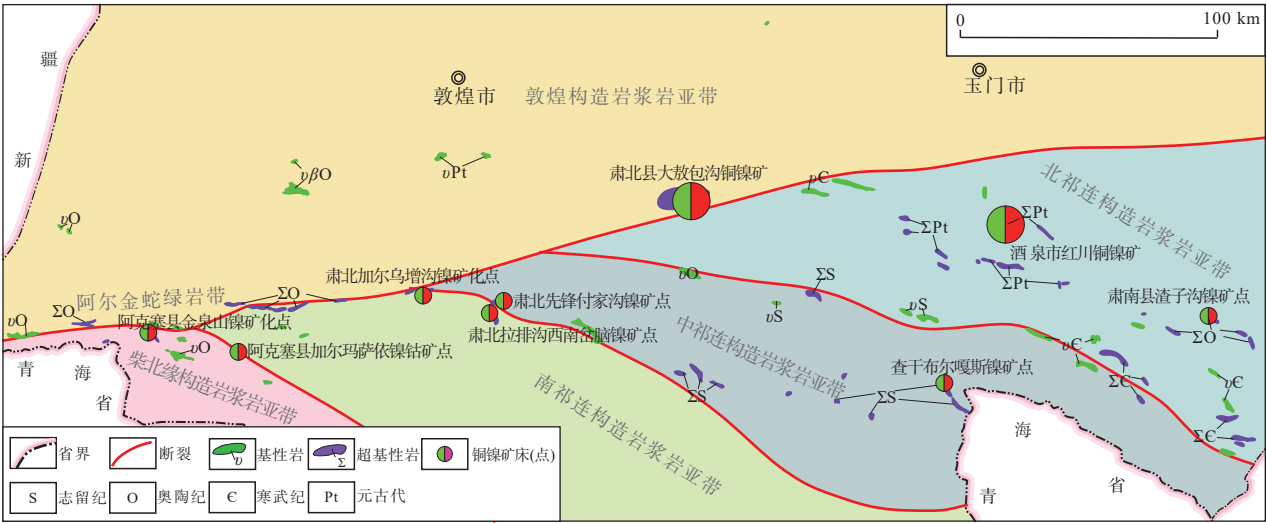


图8 阿尔金-祁连西段地区基性-超基性岩与铜镍矿分布图

Fig. 8 Distribution map of mafic-ultramafic rocks and copper-nickel deposits in the western segment of the Altyn-Qilian region

表 8 大敖包沟含矿镁铁-超镁铁岩岩石地球化学特征表

Tab. 8 Geochemical characteristics of ore-bearing mafic-ultramafic rocks in the Da'aobaogou area

| 样号                             | DAG06  | DAG07 | DAG08 | DAG10 | DAG11 | DAG14 | DAG15 | DAG17 | DAG18 |
|--------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 岩性                             | 橄榄辉石岩  |       |       | 辉石岩   |       |       | 辉长岩   |       |       |
| SiO <sub>2</sub>               | 47.4   | 45.5  | 45.3  | 44.2  | 49.1  | 46.5  | 45.3  | 48.8  | 47.3  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.20   | 0.21  | 0.20  | 0.43  | 0.23  | 0.24  | 0.20  | 0.45  | 0.59  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.55   | 3.42  | 3.88  | 10.70 | 3.28  | 3.78  | 4.25  | 15.55 | 16.05 |
| FeO <sup>T</sup>               | 11.47  | 13.06 | 12.03 | 5.99  | 12.07 | 11.92 | 11.57 | 8.81  | 8.80  |
| MnO                            | 0.16   | 0.16  | 0.16  | 0.08  | 0.17  | 0.16  | 0.15  | 0.15  | 0.14  |
| MgO                            | 28.2   | 30.0  | 29.10 | 21.30 | 29.60 | 28.70 | 28.30 | 8.49  | 9.27  |
| CaO                            | 3.91   | 3.00  | 4.00  | 11.10 | 2.76  | 4.12  | 3.99  | 12.55 | 11.90 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.45   | 0.47  | 0.55  | 1.44  | 0.47  | 0.56  | 0.40  | 2.67  | 2.17  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.23   | 0.36  | 0.38  | 0.20  | 0.39  | 0.43  | 0.10  | 0.99  | 1.40  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.05   | 0.04  | 0.04  | 0.03  | 0.04  | 0.05  | 0.04  | 0.03  | 0.05  |
| LOI                            | 4.50   | 3.63  | 4.29  | 4.26  | 1.83  | 3.53  | 5.28  | 1.17  | 1.64  |
| Total                          | 100.17 | 99.85 | 99.93 | 99.73 | 99.94 | 99.99 | 99.58 | 99.66 | 99.31 |
| m/f                            | 4.53   | 4.28  | 4.47  | 6.10  | 4.54  | 4.45  | 4.51  | 1.73  | 1.89  |
| Mg <sup>#</sup>                | 0.86   | 0.85  | 0.86  | 0.92  | 0.86  | 0.86  | 0.86  | 0.73  | 0.75  |

表9 大敖包沟含矿岩体微量元素分析测试结果( $10^{-6}$ )Tab. 9 Trace element( $10^{-6}$ ) analysis results of the Da'aobaogou rock body

| 样号                   | DAG 06 | DAG 07 | DAG 08 | DAG 10 | DAG 11 | DAG 14 | DAG 15 | DAG 17 | DAG18 |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 岩性                   | 橄榄辉石岩  |        |        | 辉石岩    |        |        |        | 辉长岩    |       |
| Li                   | 3.7    | 6.6    | 11     | 6.1    | 6.6    | 9.1    | 3.2    | 11.8   | 14.2  |
| Be                   | 0.25   | 0.16   | 0.23   | 0.25   | 0.19   | 0.23   | 0.25   | 0.56   | 0.96  |
| Sc                   | 20     | 16.2   | 18.7   | 20.9   | 18.8   | 19.4   | 17.8   | 44.1   | 36.2  |
| Ga                   | 4.91   | 4.6    | 5.06   | 11.55  | 4.94   | 5.12   | 5.3    | 15.55  | 16.4  |
| Rb                   | 8.3    | 13.1   | 13.5   | 3.6    | 14.9   | 16     | 3.4    | 22     | 33.7  |
| Sr                   | 56.1   | 95.7   | 118    | 125.5  | 70.8   | 92     | 99.7   | 256    | 272   |
| Y                    | 5.4    | 4.5    | 5.1    | 8.7    | 4.5    | 5.7    | 5      | 10.9   | 11.8  |
| Zr                   | 26.2   | 27.9   | 30     | 41.5   | 28.7   | 34.2   | 20.3   | 10.6   | 9     |
| Nb                   | 1.4    | 1.3    | 1.2    | 1.3    | 1.3    | 1.5    | 1.3    | 1.7    | 3.4   |
| Cs                   | 2.5    | 0.67   | 3.24   | 0.37   | 1.71   | 2.71   | 2.07   | 0.98   | 3.04  |
| Ba                   | 84.1   | 110    | 108.5  | 48.5   | 115.5  | 126.5  | 23.8   | 120.5  | 154.5 |
| La                   | 7      | 6.4    | 6.7    | 6.8    | 6.1    | 7.4    | 7      | 8.1    | 5.6   |
| Ce                   | 13.55  | 12.35  | 13.1   | 14.4   | 11.7   | 14.7   | 13.4   | 16.2   | 12    |
| Pr                   | 1.74   | 1.39   | 1.43   | 1.65   | 1.3    | 1.67   | 1.47   | 2.15   | 1.59  |
| Nd                   | 6.5    | 5.7    | 5.4    | 6.8    | 5      | 6.9    | 5.4    | 8.7    | 7     |
| Sm                   | 1.36   | 1.03   | 1.09   | 1.63   | 0.89   | 1.37   | 1.17   | 2.05   | 1.91  |
| Eu                   | 0.33   | 0.32   | 0.32   | 0.49   | 0.26   | 0.37   | 0.32   | 0.74   | 0.68  |
| Gd                   | 1.27   | 1.03   | 1.06   | 1.58   | 0.92   | 1.23   | 1.05   | 2.18   | 2.34  |
| Tb                   | 0.14   | 0.15   | 0.14   | 0.21   | 0.1    | 0.15   | 0.14   | 0.32   | 0.35  |
| Dy                   | 1.08   | 0.78   | 0.89   | 1.34   | 0.75   | 1.04   | 0.84   | 2.1    | 2.59  |
| Ho                   | 0.2    | 0.17   | 0.16   | 0.3    | 0.15   | 0.21   | 0.17   | 0.41   | 0.53  |
| Er                   | 0.55   | 0.5    | 0.55   | 0.79   | 0.49   | 0.57   | 0.47   | 1.34   | 1.63  |
| Tm                   | 0.11   | 0.11   | 0.1    | 0.13   | 0.09   | 0.14   | 0.1    | 0.18   | 0.27  |
| Yb                   | 0.58   | 0.43   | 0.46   | 0.72   | 0.42   | 0.54   | 0.48   | 1.22   | 1.48  |
| Lu                   | 0.08   | 0.08   | 0.07   | 0.12   | 0.08   | 0.08   | 0.08   | 0.18   | 0.26  |
| Hf                   | 0.7    | 0.7    | 0.8    | 1.5    | 0.7    | 0.9    | 0.6    | 0.4    | 0.5   |
| Ta                   | 0.08   | 0.07   | 0.07   | 0.09   | 0.08   | 0.09   | 0.07   | 0.17   | 0.21  |
| Ti                   | 1 440  | 1 230  | 1 180  | 2 490  | 1 370  | 1 380  | 1 200  | 3 310  | 4 100 |
| Pb                   | 1.7    | 1.8    | 2      | 4.4    | 2      | 2.1    | 2.1    | 5.3    | 4.8   |
| Bi                   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.13   | 0.02   | 0.01   | 0.03   | 0.03   | 0.09  |
| Th                   | 1.4    | 1.3    | 1.3    | 1.1    | 1.4    | 1.5    | 1.5    | 1.6    | 0.9   |
| U                    | 0.3    | 0.2    | 0.2    | 0.2    | 0.3    | 0.3    | 0.2    | 0.3    | 0.3   |
| V                    | 84     | 66     | 71     | 69     | 79     | 76     | 69     | 197    | 202   |
| Cr                   | 741    | 761    | 646    | 15     | 923    | 654    | 601    | 416    | 63    |
| Co                   | 102.5  | 131    | 118.5  | 29.5   | 111.5  | 111    | 114    | 42.9   | 43.7  |
| Ni                   | 691    | 1 250  | 909    | 304    | 825    | 769    | 812    | 102    | 154.5 |
| Cu                   | 79.7   | 169.5  | 121    | 163    | 116.5  | 63.3   | 99.9   | 28.9   | 98.2  |
| ΣREE                 | 34.49  | 30.44  | 31.47  | 36.96  | 28.25  | 36.37  | 32.09  | 45.87  | 38.23 |
| LREE/HREE            | 7.60   | 8.37   | 8.17   | 6.12   | 8.42   | 8.18   | 8.64   | 4.78   | 3.05  |
| (La/Yb) <sub>N</sub> | 8.16   | 10.06  | 9.84   | 6.38   | 9.81   | 9.26   | 9.85   | 4.49   | 2.56  |
| δEu                  | 0.76   | 0.94   | 0.90   | 0.92   | 0.87   | 0.85   | 0.87   | 1.06   | 0.98  |
| δCe                  | 0.89   | 0.94   | 0.95   | 0.98   | 0.94   | 0.95   | 0.94   | 0.90   | 0.93  |
| La/Sm                | 5.15   | 6.21   | 6.15   | 4.17   | 6.85   | 5.40   | 5.98   | 3.95   | 2.93  |
| Th/Ta                | 17.50  | 18.57  | 18.57  | 12.22  | 17.50  | 16.67  | 21.43  | 9.41   | 4.29  |
| Nb/U                 | 4.67   | 6.50   | 6.00   | 6.50   | 4.33   | 5.00   | 6.50   | 11.33  | 10.67 |
| Ce/Pb                | 7.97   | 6.86   | 6.55   | 3.27   | 5.85   | 7.00   | 6.38   | 3.06   | 2.50  |
| Ta/Yb                | 0.14   | 0.16   | 0.15   | 0.13   | 0.19   | 0.17   | 0.15   | 0.14   | 0.14  |
| Hf/Ta                | 8.75   | 10.00  | 11.43  | 16.67  | 8.75   | 10.00  | 8.57   | 2.35   | 2.38  |



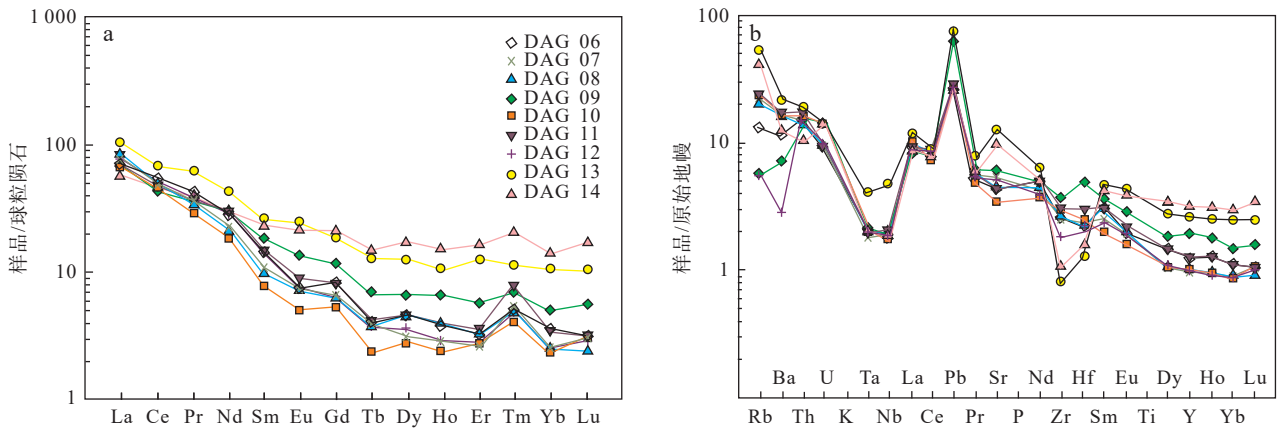


图9 岩体稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 9 (a) Chondrite-normalized rare earth element (REE) partition diagram and (b) primitive mantle-normalized trace element spider diagram for the rock

相对亏损的特点。Th/Ta 平均值 15.13, 远大于原始地幔 Th/Ta 值 2.2, La/Sm 值为 5.2 ( $> 4.5$ ), Nb、Ta 负异常, Nb/U (4.33~11.33)、Ce/Pb (2.50~7.97)、Th/Ta 值 (4.29~21.43), 指示在岩浆作用过程中有地壳物质混染。

## 2 甘肃岩浆铜镍硫化物矿床找矿潜力

中国岩浆铜镍钴硫化物矿床基本上分布于塔里木、华北和扬子克拉通的边缘及其造山带中(李文渊, 2015, 2020, 2022), 甘肃省具有规模的镍矿床主要产于龙首山和北山成矿带。截至 2022 年底, 甘肃省累计查明镍资源储量 642 万 t, 保有 351.44 万 t, 其中金川累计查明镍资源储量 624.98 万 t、保有 329.36 万 t。

近年来, 甘肃省先后发现了大敖包沟、红川、成宣、铭扬、加尔玛萨依等铜镍矿床(点), 通过对超基性岩体引起的航磁异常、地球化学异常及含矿性剖析研究, 圈定有进一步工作价值的铜镍找矿靶区 28 处, 均显示出甘肃省已知铜镍矿床深边部以及龙首山、北山、阿尔金山-祁连山西段具有铜镍矿找矿潜力。

### 2.1 北山地区

北山地区共有 3 个与铜镍成矿有关的基性-超基性岩带(图 6)。北带四顶黑山基性-超基性岩带: 岩体以橄辉岩、辉石岩、辉长岩相为主, 形成时代为晚泥盆-石炭世。区域上发现的矿床(点)有四顶黑山铜镍矿点、双沟山铜镍矿等, 铜镍矿化主要赋存于蚀变橄辉岩、辉石岩、辉长岩中, 矿化类型主要为星点状、脉状、稀疏浸染状、浸染状、团块状、碎裂状等, Cu、

Ni、Co 元素含量随岩石基性程度增高而增高。

中带玉石山-黑山超基性岩带: 自西向东分布有辉铜山、大山头、大头山南、柳园北、三个井、黑山、怪石山等 22 个岩体(群), 其中, 黑山、大山头、大头山南、三个井、怪石山等基性-超基性岩体中发现铜镍矿化, 形成时代为泥盆纪。总体呈带状分布, 成群成片出现。按其控岩地质条件和空间位置, 以双井-同昌口山间坳陷以北区域性断裂为界可划分为南、北两个岩体群, 北岩体群有 5 个岩体, 南岩体群有 11 个岩体。从成矿地质条件来看, 南岩体群中除黑山岩体外, 还在大山头南岩体群和玉石山岩体群的基性-超基性岩中发现了较好的铜镍矿化。其含矿岩体的化学成分与黑山含矿岩体特征基本相同, 岩石中的  $MgO$ 、 $Fe_2O_3$  含量随岩石基性程度的增加而升高, 属铁质基性-超基性岩体。这两个岩体群也是区内寻找铜镍矿和多金属矿产的有利地带。鉴于在黑山和怪石山基性-超基性岩体中找到了具有工业价值的镍多金属矿, 其中, 怪石山岩体北发现的隐伏超基性岩体应该是怪石山的下盘岩体, 已发现的隐伏岩体与黑山铜镍矿床处于同一构造带上, 岩体具多期侵位特点, 岩石类型丰富, 从辉长岩相到橄榄岩相再到辉石岩相均有出现, 岩浆演化过程中主要发生了橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和斜长石的分离结晶作用, 且分离结晶在岩浆演化过程中占主导地位, 说明岩浆分异充分, 有利于成矿物质的富集; 采用地、物、化、遥等综合方法找矿, 加强找矿力度, 有望发现新的同类型镍矿产地。

南带成宣-铭扬基性-超基性带: 共圈定岩体 180 个, 形成时代多为二叠纪。目前发现成宣铜镍矿产地

和一系列铜镍矿点。该地区与铜镍矿化基性-超基性岩有关的航磁异常发育, 铭杨铜镍矿区及外围已证实由基性-超基性岩引起的航磁异常 13 个, 包括铭杨铜镍矿点, 柳园北基性岩体周边分布与超基性岩有关的 3 个航磁异常, 基性岩脉出露在异常中心, 该区存在岩浆多期次侵入特征, 具有良好的成矿地质条件。

## 2.2 阿尔金-祁连地区

阿尔金-祁连山西段共发现基性-超基性岩体(群) 1 206 个(图 9), 圈定找矿靶区 9 处, 目前已发现红川、大敖包沟、查干布尔嘎斯、查子沟、拉排沟等熔离型铜镍矿(点)床。

阿尔金-祁连地区分布有同构造走向的超基性岩, 这些超基性岩受长期持续的构造活动, 部分超基性岩体具深变质作用, 蚀变为菱镁片岩; 带内 Fe、Ni、Co、Cr、Ti、V 等组合异常沿阿尔金断裂带和祁连造山带分布, 部分串珠状的高背景区与超基性岩体吻合; 近年来在大敖包沟勘查证实, 在大理岩下部发现了具铜镍矿化的隐伏超基性岩体, 亦显示大敖包沟东、西 Fe、Ni、Co、Cr、Ti、V 等组合异常具有隐伏含矿超基性岩体的找矿潜力, 如何甄别这些板块缝合带蛇绿岩中的基性-超基性岩是幔源岩浆部分熔融形成的含铜镍硫化物基性-超基性岩, 是阿尔金-祁连山西段地区找寻岩浆型铜镍硫化物矿床的关键, 应加大对这些组合异常的查证力度。此外, 在查干布尔嘎斯发现 Ni、Co 成矿有关超基性岩体, 矿化体出露宽度一般都大于 200 m, 长度一般大于 100 m, 其中 Ni-1 矿体长度大于 3 100 m、宽为 25 m; Ni 平均品位一般为 0.21%~0.45%, 最高为 0.646%, 显示出巨大的找矿潜力。

## 2.3 龙首山地区

龙首山地区共圈定基性-超基性岩体 142 个(图 3), 目前已发现有金川超大型铜镍矿床。通过对龙首山地区塔马子沟、金川、金川西、西井等铜镍矿进行成矿预测, 2 000 m 以浅预测镍资源量为 722 万 t, 铜为 545 万 t, 钴为 18 万 t, 同时, 在金川矿床的 I、III、IV 隐伏岩体钻探发现了富而厚大的铜镍矿体, 表明龙首山地区深边部仍有较大的找矿潜力。

# 3 结论

(1) 甘肃省含铜镍硫化物基性-超基性岩体从时间上大致可分为中晚元古代、早古生代和晚古生代 3 个侵入时代, 多形成于大陆裂谷环境和造山带伸展

环境。含矿基性-超基性岩体多数经推覆作用后上升裸露于地表, 沿深大断裂分布, 且变形、蚀变强, 多位于断裂构造下盘。

(2) 甘肃省北山地区四顶黑山岩体(群)、黑山岩体(群)、铭杨岩体(群)和成宣岩体(群)铜镍成矿好, 具有较大找矿潜力; 阿尔金-祁连地区的大敖包沟岩体和查干布尔嘎斯岩体(群)具有一定的铜镍找矿潜力; 龙首山地区在金川岩体深部、塔马子沟岩体(群)等具有较好的铜镍找矿潜力。

(3) 含矿超基性岩浆在上升过程中充分熔离和分异作用是能否形成铜镍硫化物矿床的关键, 岩浆晚期就地熔离及贯入作用形成熔离和贯入矿体; 岩体交代围岩, 可形成接触交代矿体; 岩浆期后的热液作用可形成热液矿体。含矿基性-超基性岩体和近矿围岩有较强的蛇纹石化、绿泥石化、透闪石化、滑石菱镁矿化等褪色现象, 可作为重要找矿标志。

## 参考文献(References):

- 白云来, 张汉成, 李卫红, 等. 论甘肃北山中部铜镍成矿系统的构造背景[J]. 甘肃地质学报, 2002, 11(2): 29-44.
- BAI Yunlai, ZHANG Hancheng, LI Weihong, et al. On the geotectonic background of the nickel-copper metallogenic system of the central beishan mountains in Gansu China[J]. Acta Geologica Gansu, 2002, 11(2): 29-44.
- 卜鹏, 徐思超, 刘孜. 新疆东天山坡-铜镍矿地质特征及找矿远景分析[J]. 世界有色金属, 2018(20): 93-96+98.
- BU Peng, XU Sichao, LIU Zi. Geological characteristics and prospecting potential analysis of a copper-nickel deposit in Dongtianshan, Xinjiang[J]. Prospecting Technology, 2018(20): 93-96+98.
- 段俊, 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]. 西安: 长安大学, 2012.
- DUAN Jun, Petrogenesis and Metallogenic Potential of Zangbutai Mafic-Ultramafic Intrusion in Longshoushan, Gansu province [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- 龚振中, 杨镇熙, 周登峰, 等. 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, 2024, 51(1): 364-365.
- GONG Zhenzhong, YANG Zhenxi, ZHOU Dengfeng, et al. 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, 2024, 51(1): 364-365.
- 康鸿杰, 苏欣, 王永豪, 等. 塔里木板块东南缘敦煌地块内大敖包沟铜镍矿化镁铁-超镁铁质岩年代学、岩石地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2024, 43(6): 1239-1254.

- KANG Hongjie, SU Xin, WANG Yonghao, et al. Geochronology and geochemistry of Cu-Ni mineralized mafic ultramafic rocks in the Daaobaogou deposit of the Dunhuang Block in the southeastern margin of the Tarim Plate. *Bulletin of Mineralogy [J]. Petrology and Geochemistry*, 2024, 43(6): 1239–1254.
- 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.
- 黄增保. 甘肃大道尔吉铬铁矿矿床成矿岩体地球化学特征及其研究意义 [D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- HUANG Zengbao, Geochemical characteristics and significances of the Dadao Erji chromite deposit ore-forming rock in Gansu province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- 姜常义, 郭娜欣, 夏明哲, 等. 塔里木板块东北部坡一镁铁质-超镁铁质层状侵入体岩石成因 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(7): 2209–2223.
- JIANG Changyi, GUO Naxin, XIA Mingzhe, et al. Petrogenesis of the Poyi mafic ultramafic layered intrusion, NE Tarim Plate [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(7): 2209–2223.
- 姜常义, 凌锦兰, 周伟, 等. 东昆仑夏日哈木镁铁质-超镁铁质岩体岩石成因与拉张型岛弧背景 [J]. *岩石学报*, 2015, 31(4): 1117–1136.
- JIANG Changyi, LING Jinlan, ZHOU Wei, et al. Petrogenesis of the Xiarihamu Ni bearing layered mafic-ultramafic intrusion, East Kunlun: Implications for its extensional island arc environment [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(4): 1117–1136.
- 刘聪. 北山造山带成宣含铜镍矿镁铁-超镁铁质岩体成因研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2024.
- LIU Cong. Genetic study on the Chengxuan Cu-Ni sulfide ore-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Beishan orogenic belt [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2024.
- 李奇祥, 廖群安, 三金柱, 等. 新疆哈密四顶黑山地区镁铁质-超镁铁岩特征及其构造意义 [J]. *地质科技情报*, 2010, 29(4): 14–20.
- LI Qixiang, LIAO Qun'an, SAN Jinzhu, et al. Characteristics and Tectonic Significances of the Mafic-Ultramafic Rocks from Sidingheishan Area in Hami Xinjiang [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(4): 14–20.
- 黎彤. 化学元素的地球丰度 [J]. *地球化学*, 1976(3): 167–174.
- LI Tong. Terrestrial Abundance of Chemical Elements [J]. *Geochimica*, 1976(3): 167–174.
- 李文渊, 汤中立, 郭周平, 等. 阿拉善地块南缘镁铁-超镁铁岩形成时代及地球化学特征 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2004, 23(2): 117–127.
- LI Wenyuan, TANG Zhongli, GUO Zhouping, et al. Petrogenetic epoch and geochemical characteristics of mafic-ultramafic rocks on the southern margin of Alxa massif in northern China [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2004, 23(2): 117–127.
- 李文渊. 中国西北部成矿地质特征及找矿新发现 [J]. *中国地质*, 2015, 42(3): 365–380.
- LI Wenyuan. Metallogenic geological characteristics and newly discovered orebodies in Northwest China [J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 365–380.
- 李文渊, 张照伟, 王亚磊, 等. 新疆北部晚古生代大规模岩浆作用与成矿耦合关系研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2019, 1–324.
- 李文渊, 王亚磊, 钱兵, 等. 塔里木陆块周缘岩浆 Cu-Ni-Co 硫化物矿床形成的探讨 [J]. *地学前缘*, 2020, 27(2): 276–293.
- LI Wenyuan. WANG Yalei, QIAN Bing, et al. Discussion on the formation of magmatic Cu-Ni-Co sulfide desposits in margin of Tarim Block [J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(2): 276–293.
- 李文渊. 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*, 2022, 28(5): 793–820.
- LI Wenyuan. Study of ore-forming theoretical innovation and prospecting breakthrough of magmatic copper-nickel-cobalt sulfide deposits in China [J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(5): 793–820.
- 李献华, 苏犁, 宋彪, 等. 金川超镁铁侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义 [J]. *科学通报*, 2004, 49(4): 420–422.
- LI Xianhua, SU Li, SONG Biao, et al. SHRIMP U-Pb zircon age of the Jinchuan ultramafic intrusion and its geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(4): 420–422.
- 毛景文, 杨建民, 屈文俊, 等. 新疆黄山东铜镍硫化物矿 Re-Os 同位素测定及其地球动力学意义 [J]. *矿床地质*, 2002, 21(4): 323–330.
- MAO Jingwen, YANG Jianmin, QU Wenjun, et al. Re-Os Dating of Cu-Ni Sulfide Ores from Huangshandong Deposit in Xinjiang and Its Geodynamic Significance [J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21(4): 323–330.
- 孟繁聪, 张建新, 郭春满, 等. 大盆大坂 MOR 型和 SZZ 型蛇绿岩对北祁连洋演化的制约 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(5): 453–466.
- MENG Fancong, ZHANG Jianxin, GUO Chunman, et al. strains on the evolution of the North Qilian ocean basin: MOR-type and SSZ-type ophiolites from Dachadaban [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(5): 453–466.
- 任文秀, 黄增保, 王军, 等. 东天山玉石山蛇绿混杂岩带辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义 [J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2020, 56(5): 690–701.
- REN Wenxiu, HUANG Zengbao, WANG Jun, et al. Zircon U-Pb age based on LA-ICP-MS and its tectonic significance in the

- Yushishan ophiolitic melange[J]. Journal of Lanzhou University, Natural Sciences, 2020, 56(5): 690–701.
- 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, 等. 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据 [J]. 地质学报, 2004, 78(5): 649–657.
- SHI Rendeng, YANG Jingsui, WU Cailai, et al. First SHRIMP Dating for the Formation of the Late Sinian Yushigou Ophiolite, North Qilian Mountains[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(5): 649–657.
- 汤中立, 任端进, 薛增瑞, 等. 中国镍矿床 [M]. 北京: 地质出版社, 1989, 104–123.
- 汤中立, 杨杰东, 徐士进, 等. 金川含矿超铁镁岩的 Sm-Nd 定年 [J]. 科学通报, 1992, 37(10): 918–920.
- TANG Zhongli, YANG Jiedong, XU Shijin, et al. Sm-Nd Dating of the Jinchuan Ore-Bearing Ultramafic Rocks[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(10): 918–920.
- 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, 1–209.
- 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 中国镍铜铂岩浆硫化物矿床与成矿预测 [M]. 北京: 地质出版社, 2006, 1–304.
- 田毓龙, 武栓军, 孟蓉, 等. 金川超镁铁质岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 [J]. 矿物学报, 2007, 27: 211–217.
- TIAN Yulong, WU Shuanjun, MENG Rong, et al. LA-ICPMS Zircon U-Pb age of the Jinchuan ultramafic intrusion[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2007, 27: 211–217.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 甘肃新疆交界地区四顶黑山镁铁质-超镁铁质岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义 [J]. 地质通报, 2012, 31(12): 2046–2051.
- WANG Guoqiang, LI Xiangmin, XU Xueyi, et al. Zircon U-Pb ages of Sidingheishan mafic-ultramafic rocks in Xinjiang-Gansu border area and their geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(12): 2046–2051.
- 王军, 李小强, 梁明宏, 等. 阿尔金山东段阿克塞蛇绿岩地质地球化学特征及形成时代 [J]. 地质通报, 2018, 37(4): 559–569.
- WANG Jun, LI Xiaoqiang, LIANG Minghong, et al. Age and geochemistry of Aksay ophiolite in East Altun Mountains[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(4): 559–569.
- 王小红, 杨建国, 王磊, 等. 地质物化探综合方法在甘肃北山红柳沟铜镍矿的应用 [J]. 西北地质, 2023, 56(6): 254–261.
- WANG Xiaohong, YANG Jianguo, WANG Lei, et al. The Application Effect of Geological Geophysical and Geochemical Exploration Comprehensive Method in Hongliugou Copper-Nickel Deposit, Beishan, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 254–261.
- 王学银, 王党琦, 丁书宏, 等. 甘肃省金昌市白家嘴子矿区镍铜矿资源储量核实报告 [R]. 甘肃省地质矿产勘查开发局第四地质矿产勘查院, 2017.
- 王磊, 杨建国, 王小红, 等. 甘肃北山大山头南基性-超基性杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 2015, 34(5): 697–705.
- WANG Lei, YANG Jianguo, WANG Xiaohong, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age of Dashantounan basic-ultrabasic intrusion complex in the Beishan Mountain, Gansu Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2015, 34(5): 697–705.
- 宋谢炎. 岩浆硫化物矿床研究现状及重要科学问题 [J]. 矿床地质, 2019, 38(4): 699–710.
- SONG Xieyan. Current research status and important issues of magmatic sulfide deposits[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(4): 699–710.
- 谢燮, 杨建国, 王小红, 等. 甘肃北山红柳沟铜镍矿化基性-超基性岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 中国地质, 2015, 42(2): 396–405.
- XIE Xie, YANG Jianguo, WANG Xiaohong, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Hongliugou mafic-ultramafic complex in the Beishan area of Gansu Province and its geological significance [J]. Geology in China, 2015, 42(2): 396–405.
- 谢燮, 杨建国, 张东阳, 等. 甘肃北山铭杨镁铁-超镁铁岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. 西北地质, 2024, 57(1): 179–195.
- XIE Xie, YANG Jianguo, ZHANG Dongyang, et al. Geochemistry and Zircon U-Pb Dating of the Mingyang Mafic-Ultramafic Rock Complex in Beishan Area of Gansu and Its Prospecting Significance[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 179–195.
- 夏小洪, 宋述光. 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, 2010, 55(15): 1465–1477.
- XIA Xiaohong, SONG Sunguang. Forming age and tectono-petrogeneses of the Jiugequan ophiolite in the North Qilian Mountain, NW China[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15): 1465–1477.
- 夏小洪, 孙楠, 宋述光, 等. 北祁连西段熬油沟-二只哈拉达坂蛇绿岩的形成环境和时代 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2012, 48(5): 757–769.
- XIA Xiaohong, SUN Nan, SONG Shuguang, et al. Age and Tectonic Setting of the Aoyougou- Erzhihaladaban Ophiolite in the Western North Qilian Mountains, NW China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(5): 757–769.
- 相振群, 陆松年, 李怀坤, 等. 北祁连西段熬油沟辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义 [J]. 地质通报, 2007, 26(12): 1686–1691.
- XIANG Zhenqun, LU Songnian, LI Huaikun, et al. SHRIMP U-Pb zircon age of gabbro in Aoyougou in the western segment of the North Qilian Mountains, China and its geological implications [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(12): 1686–1691.
- 杨建国, 王磊, 王小红, 等. 甘肃北山地区黑山铜镍矿化基性-超基性杂岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 地



- 质通报, 2012, 31(2-3): 448-454.
- YANG Jianguo, WANG Lei, WANG Xiaohong, 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.
- 杨建国, 王磊, 谢燮, 等. 甘肃北山怪石山铜镍矿化基性-超基性杂岩体锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(1): 98-108.
- YANG Jianguo, WANG Lei, XIE Xie, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Age and its Signification of Guaishishan Mafic-ultramafic Complex in Beishan Mountains, Gan Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(1): 98-108.
- 杨胜洪, 陈江峰, 屈文俊, 等. 金川铜镍硫化物矿床的 Re-Os 年龄及其意义[J]. 地球化学, 2007, 36(1): 27-36.
- YANG Shenghong, CHEN Jiangfeng, QU Wenjun, et al. Re-Os "ages" of Jinchuan copper-nickel sulfide deposit and their significance[J]. Geochimica, 2007, 36(1): 27-36.
- 赵斌斌, 俞胜, 陈世强, 等. 甘肃北山造山带南缘发现岩浆熔离型铜镍硫化物矿化类型[J/OL]. 地质论评, 2024, 1-6.
- ZHAO Binbin, YU Sheng, CHEN Shiqiang, et al. The discovery of magma liquation-type Cu-Ni sulfide mineralization in Gansu Province on the southern margin of Beishan Orogenic Belt[J/OL]. Geological Review, 2024, 1-6.
- 张宗清, 杜安道, 唐索寒, 等. 金川铜镍矿床年龄和源区同位素地球化学特征[J]. 地质学报, 2004, 78(3): 359-365.
- ZHANG Zongqing, DU Andao, TANG Suohan, et al. Age of the Jinchuan Copper-Nickel Deposit and Isotopic Geochemical Feature of Its Source[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(3): 359-365.
- Arndtn T, Czamanskegk, Walkerrj, et al. Geochemistry and origin of the intrusive hosts of the Noril'sk-Talnakh Cu-Ni-PG Esulfidedeposits[J]. Economic Geology, 2003, 98(3): 495-515.
- Horan M F, Walker R J, Fedorenko V A, et al. Osmium and neodymium isotopic constraints on the temporal and spatial evolution of Siberian flood basalt sources[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(24): 5159-5168.
- Keays R, Ihlenfeld C, Mcinnes B, et al. Re-Os isotope dating of the Jinchuan Ni-Cu-PGE sulfide deposit, China[J]. IGCP, 2004: 41-42.
- Naldrett A J. Magmatic sulfide deposits[M]. Oxford: Oxford University Presss, 1989, 1-196.
- Naldrett A J. Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration[M]. Berlin: Springer, 2004, 1-727.
- Pirajno F. Ore deposits and mantle plumes[M]. London: Springer, 2000, 1-540.
- Qin K Z, Su B X, Sakyi P A, et al. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): constraints on a ca. 280 Ma mantle plume[J]. American Journal of Science, 2011, 311(3): 237-260.
- Song S G, Niu Y L, Su L, et al. Tectonics of the North Qilian Orogen, NW China[J]. Gondwana Research, 2013, 23: 1378-1401.
- Su B X, Qin K Z, Sakyi P A, et al. Geochronologic-petrochemical studies of the Hongshishan mafic-ultramafic intrusion, Beishan area, Xinjiang (NW China): petrogenesis and tectonic implications[J]. International Geology Review, 2012, 54: 270-289.
- Su S G, Deng JF, Tang ZL, et al. Mineralization characteristics of platinum group elements in Jinchuan Cu-Ni PGE deposit[D]. Hong Kong: The University of Hong Kong, 2004: 43-47.
- Tang D M, Qin K Z, Li C S et al. Zircon dating, Hf-Sr-Nd-Os isotopes and PGE geochemistry of the Tianyu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, NW China[J]. Lithos, 2011, 126: 84-98.
- Yang G, Du A D, Qu W J, et al. Pt-Os and Re-Os dating of ores from Jinchuan Cu-Ni PGE deposit a world class Ni deposit[J]. Mineralium Deposita, 2004: 1-56.
- Xie W, Song X Y, Deng Y F, et al. Geochemistry and petrogenetic implications of a Late Devonian mafic-ultramafic intrusion at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 2012, 144: 209-230.
- Xue S C, Qin K Z, Li C, et al. 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, 2016a, 111: 1465-1484.
- Xue S C, Li C, Qin K Z, et al. A non-plume model for the Permian protracted (266-286 Ma) basaltic magmatism in the Beishan-Tianshan region, Xinjiang, Western China[J]. Lithos, 2016b, 256: 243-249.
- Xue S C, LI C, WANG Q F, et al. Geochronology, petrology and Sr-Nd-Hf-S isotope geochemistry of the newly-discovered Qixin magmatic Ni-Cu sulfide prospect, southern Central Asian Orogenic Belt, NW China[J]. Ore Geology Reviews, 2019, 111: 103002.