



引文格式: 房明举, 段俊, 徐刚, 等. 扬子北缘喜神坝镁铁-超镁铁岩体成因与铜镍成矿潜力研究[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 209–227. DOI: 10.12401/j.nwg.2025165

Citation: FANG Mingju, DUAN Jun, XU Gang, et al. Genesis and Cu-Ni Mineralization Potential of the Xishenba Mafic-Ultramafic Intrusion in the Northern Margin of the Yangtze Block[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 209–227. DOI: 10.12401/j.nwg.2025165

扬子北缘喜神坝镁铁-超镁铁岩体成因 与铜镍成矿潜力研究

房明举^{1,*}, 段俊^{1,*}, 徐刚¹, 孙佳², 王宁³, 吴建涛¹, 陆盈颖¹, 贾天河¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 天津华北地质勘查局, 天津 300171; 3. 陕西省地质调查院, 陕西省矿产地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘要: 喜神坝镁铁-超镁铁质岩体位于扬子克拉通北缘, 是陕西汉南地区近年新发现的岩浆铜镍矿化岩体, 具有良好的成矿潜力。该岩体由二辉橄榄岩、橄榄二辉岩、辉长岩组成, 矿体主要赋存于二辉橄榄岩体中, 硫化物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿。喜神坝岩体中锆石 U-Pb 谐和年龄为 (854 ± 3) Ma, 表明其形成于新元古代中期。辉长岩具轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型稀土元素分配模式, 橄榄二辉岩和二辉橄榄岩呈轻稀土元素略微富集的平坦型分配模式, 所有样品均具有富集大离子亲石元素 (Rb、K), 亏损高场强元素 (Nb-Ta、Zr-Hf) 的特征, 类似于扬子北缘其他新元古代镁铁-超镁铁质岩体和全球岛弧玄武岩的特征, 表明其形成于板块汇聚背景。赋矿的二辉橄榄岩中橄榄石晶体的 Fo 值为 76.0~80.9 mol%, Ni 含量为 $<200 \times 10^{-6} \sim 1445 \times 10^{-6}$, 两者相关性表明喜神坝母岩浆曾发生了硫化物熔离。二辉橄榄岩中锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -6.82~4.84, 指示其来自亏损地幔源区; Hf 同位素以及 Th/Yb 和 Nb/Yb 的模拟计算表明, 岩浆上升过程中遭受了 10%~30% 的地壳物质混染, 地壳组分混染可能是硫化物熔离的主要因素。与夏日哈木、喀拉通克、四堡等汇聚背景下岩浆矿床成矿特征对比表明, 喜神坝铜镍矿床具有较好的铜镍成矿潜力, 扬子北缘同类型镁铁-超镁铁质岩体应是下一步的铜镍勘查对象。

关键词: 铜镍成矿潜力; 高程度地壳混染; 硫化物熔离; 锆石年代学与 Hf 同位素; 汉南杂岩

中图分类号: P612

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)03-0209-19

Genesis and Cu-Ni Mineralization Potential of the Xishenba Mafic-Ultramafic Intrusion in the Northern Margin of the Yangtze Block

FANG Mingju¹, DUAN Jun^{1,*}, XU Gang¹, SUN Jia², WANG Ning³, WU Jiantao¹, LU Yingying¹, JIA Tianhe¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Tianjin North China Geological Exploration Bureau, Tianjin 300171, China; 3. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

收稿日期: 2025-04-12; 修回日期: 2025-10-17; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金-联合基金项目(U2444203), 深地国家科技重大专项项目(2025ZD1007102), 陕西省自然科学基金研究计划(2023-JC-YB-224)长安大学大学生创新训练项目(S202510710401)联合资助。

作者简介: 房明举(2001-), 男, 硕士研究生, 矿床学专业。E-mail: 3176388704@qq.com。

* 通讯作者: 段俊(1986-), 男, 副教授, 主要从事矿床学的研究与教学。E-mail: duanjun108@163.com。

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

Abstract: Xishenba mafic-ultramafic intrusion is located on the northern margin of the Yangtze Craton. It is a newly discovered magmatic Cu-Ni mineralized intrusion in Hannan, Shaanxi Province, with significant mineralization potential. The intrusion consists of lherzolite, olivine lherzolite, and gabbro. The ore bodies are predominantly hosted within the lherzolite unit, with sulfides mainly comprising pyrrhotite, pentlandite, and chalcopyrite. Zircon U-Pb concordant age of the Xishenba intrusion is (854 ± 3) Ma, indicating that it was formed in the middle Neoproterozoic. Geochemically, gabbro exhibit right-inclined REE patterns characterized by light rare earth element (LREE) enrichment and heavy rare earth element (HREE) depletion. In contrast, olivine lherzolite and lherzolite display relatively flat REE patterns with slight LREE enrichment. All samples are enriched in large ion lithophile elements (Rb, K) and depleted in high field strength elements (Nb-Ta, Zr-Hf). These geochemical characteristics are similar to those of other Neoproterozoic mafic-ultramafic intrusions along the northern margin of the Yangtze Block and global island arc basalts, suggesting a plate convergence setting. Olivine crystals from the ore-bearing lherzolite have Fo value of 76.0~80.9 mol%, Ni content of $<200 \times 10^{-6}$ to 1445×10^{-6} . The correlation between these parameters suggests that sulfide segregation occurred in the parental magma of the Xishenba intrusion. Zircon from the lherzolite yield $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value of $-6.82 \sim 4.84$, indicative of a depleted mantle source. Modeling based on Hf isotopes and Th/Yb-Nb/Yb systematics suggests that the magma experienced 10%~30% crustal contamination during ascent, which was likely the key factor triggering sulfide segregation. Comparative analysis with magmatic deposits formed in convergent settings, such as those at Xiarihamu, Kalatongke, and Sibao, reveals that the Xishenba Cu-Ni deposit possesses significant mineralization potential. Consequently, similar types of mafic-ultramafic intrusions along the northern margin of the Yangtze Block should be prioritized as targets for future Cu-Ni exploration.

Keywords: Cu-Ni mineralization potential; high degree of crustal contamination; sulfide melting; zircon geochronology and Hf isotopes; Hannan complex

岩浆铜镍硫化物矿床是全球镍金属的主要来源 (Naldrett, 2010; Li et al., 2019), 也是中国镍金属的主要来源。世界上大部分的大型岩浆铜镍矿床位于克拉通的边缘 (Maier et al., 2011), 全球最大的 Noril'sk 铜镍矿床位于西伯利亚克拉通边缘 (Barnes et al., 2020)、非洲最大的 Kabanga 铜镍矿床位于坦桑尼亚克拉通西缘 (Maier et al., 2010)、中国最大的金川铜镍矿床位于华北克拉通西南缘 (汤中立等, 2011; 段俊等, 2025; 王亚磊等, 2025)。此外, 随着中国中亚造山带南缘东天山-北山铜镍成矿带 (宋谢炎等, 2023; 陈阳阳等, 2024; 张愿宁等, 2025) 以及东昆仑造山带夏日哈木超大型镍钴矿床 (李文渊等, 2023; 赵达成等, 2023; Mao et al., 2024; 艾启兴等, 2025) 的发现 (图 1), 表明造山带中也具有非常好的铜镍成矿潜力。

扬子克拉通周缘分布着大量的新元古代铜镍矿化镁铁-超镁铁质岩体, 如扬子西缘冷水箐中型 Cu-Ni 矿床 (Zhu et al., 2007)、扬子东南缘桂北铜镍矿集区 (16 处中小型矿床, Zhou et al., 2017) 以及扬子北缘周庵大型铜镍硫化物矿床 (王建明等, 2006)。已有研

究表明扬子克拉通东南缘铜镍矿床形成于汇聚背景 (Zhou et al., 2025), 而扬子北缘铜镍矿床成矿机制与成矿潜力仍需进一步论证。

喜神坝镁铁-超镁铁质岩体是扬子北缘近年新发现的铜镍矿化岩体, 矿石品位为铜 1.42%、镍 0.79%。笔者对喜神坝铜镍矿化的镁铁-超镁铁质岩体开展了系统的岩相学、锆石年代学和 Hf 同位素、矿物-岩石地球化学分析, 并将其与扬子克拉通周缘同时期铜镍矿化的镁铁-超镁铁质岩体以及其他相似构造背景下的铜镍矿床成矿特征进行了对比。研究表明喜神坝岩体形成于汇聚背景之下, 较高级度的地壳混染促使其发生硫化物熔离并形成铜镍矿体, 喜神坝及扬子克拉通北缘新元古代镁铁-超镁铁质岩体具有较好的铜镍成矿潜力。

1 区域地质特征

1.1 扬子北缘地质特征

扬子克拉通位于华夏板块北缘, 华北克拉通南缘,

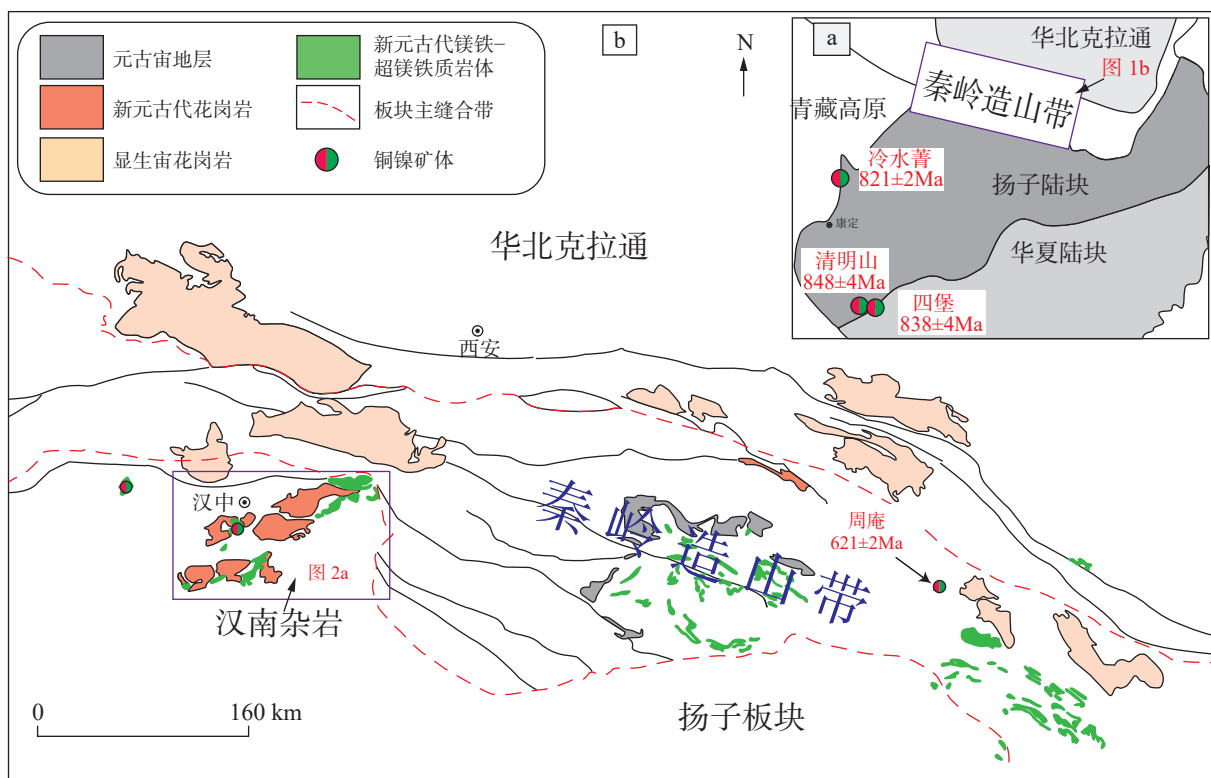


图1 扬子陆块周缘岩浆铜镍硫化物矿床分布示意图(a; 据尹福光等, 2012 修改)和扬子北缘新元古代镁铁-超镁铁质岩体分布图(b; 据 Zhao et al., 2009a 修改)

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the distribution of magmatic copper-nickel sulfide deposits around the Yangtze Block, and (b) distribution of Neoproterozoic mafic-ultramafic intrusions in the northern margin of the Yangtze Craton

青藏高原西缘(Zhao et al., 2011; 图 1)。汉南地区是扬子克拉通西北缘与秦岭造山带过渡的重要地区, 地层序列为太古宙—古元古代结晶基底, 中元古代火地垭群、新元古代青白口纪岩群, 覆盖为新元古代南华纪—震旦纪沉积序列。太古代后河岩群主要由 TTG 质混合片麻岩及少量表壳岩系组成(高山等, 1990), 变质程度达高角闪岩相, 主要岩石组合为条痕状、眼球状黑云(角闪)斜长混合岩夹斜长角闪岩、绿泥片岩、黑云斜长变粒岩。中元古代火地垭群由下而上可分为麻窝子组及上两组。麻窝子组主要岩石组合为一套中厚—厚层块状白云质大理岩夹石英岩、长英质变粒岩、绢云石英千枚岩、黑云石英片岩。上两组主要岩石组合为堇青石片岩、黑云石英片岩夹变砂岩, 底部为变含砾砂岩, 总体显示细粒碎屑岩特征。新元古代青白口纪出露铁船山组和西乡群。铁船山组是一套浅变质的酸性—基性火山熔岩、火山碎屑岩夹火山活动间隙期正常沉积泥砂质岩石组合, 西乡群为中基性—酸性火山岩和火山碎屑岩, 主要岩石类型有玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩及相应火山碎屑岩(以凝灰岩为主), 夹有细碧岩和蚀变角斑岩, 局部存在熔结

火山岩。新元古代南华纪和震旦纪沉积序列自下到上为, 南华纪: 莲沱组、南沱组, 震旦纪: 陡山沱组、灯影组。莲沱组为一套成熟度较差的粗粒碎屑岩沉积, 南沱组为一套灰绿色、紫红色泥砾岩(杂砾岩), 上部夹薄层砂岩透镜体, 与上覆陡山沱组白云岩及下伏莲沱组均呈平行不整合接触。陡山沱组为一套碎屑岩、碳酸盐沉积, 上覆灯影组呈平行不整合, 底部见少量泥质岩石, 与下伏南沱组呈整合—平行不整合接触, 灯影组为一套典型的镁质碳酸盐岩, 局部夹细粒碎屑岩, 与下伏下震旦统陡山沱组为整合接触(陕西省地质调查院, 2013)。

汉南地区新元古代的花岗质岩石以石英闪长岩—二长花岗岩带、钾长花岗岩—花岗斑岩带为主, 多数花岗质岩石为 I 型或 A 型花岗岩。这些花岗岩体包括五堵门 I 型花岗闪长岩岩体(789±10 Ma, Ling et al., 2006)、二里坝 I 型花岗闪长岩岩体(778~730 Ma, Zhao et al., 2008)、祖师殿 I 型过铝质奥长花岗岩岩体(728 Ma, 敖文昊等, 2014)、天平河 I 型花岗岩岩体(762±4 Ma, Zhao et al., 2009a)、陶家坝 I 型花岗闪长岩(770±3 Ma, Luo et al., 2018)、红庙钾质 A 型花岗岩体(802~791 Ma,

Ao et al., 2019)、喜神坝钙碱性 I 型黑云母花岗岩 (887 ± 7 Ma; Ao et al., 2019)、铁船山和黄官 A 型花岗岩 ($780 \sim 770$ Ma; Luo et al., 2018) 等。汉南地区的新元古代镁铁-超镁铁侵入体包括含铁-钛氧化物矿化的毕机沟层状侵入体 (785 ± 5 Ma; Zhao et al., 2009b)、望江山层状侵入体 (822 ± 4 Ma; Wang et al., 2016)、碑坝侵入体 (869 ± 5 Ma; Zhao et al., 2009b)、大汉山辉长岩侵入体 (793 ± 4 Ma; Ao et al., 2019) 等, 这些岩体被统

称为“汉南杂岩”(图 2a)。

1.2 汉南喜神坝地区

喜神坝矿区位于汉中南部(图 2b), 属于华南板块上扬子克拉通北部被动陆缘, 汉南米仓山隆起构造单元。区域上变形先后经历了新太古—古元古代结晶基底、中元古—青白口系过渡基底的形成阶段, 震旦系—志留系盖层、泥盆世—晚三叠世盖层的形成阶段以及晚三叠世—白垩系主造山期变形阶段, 变形构造

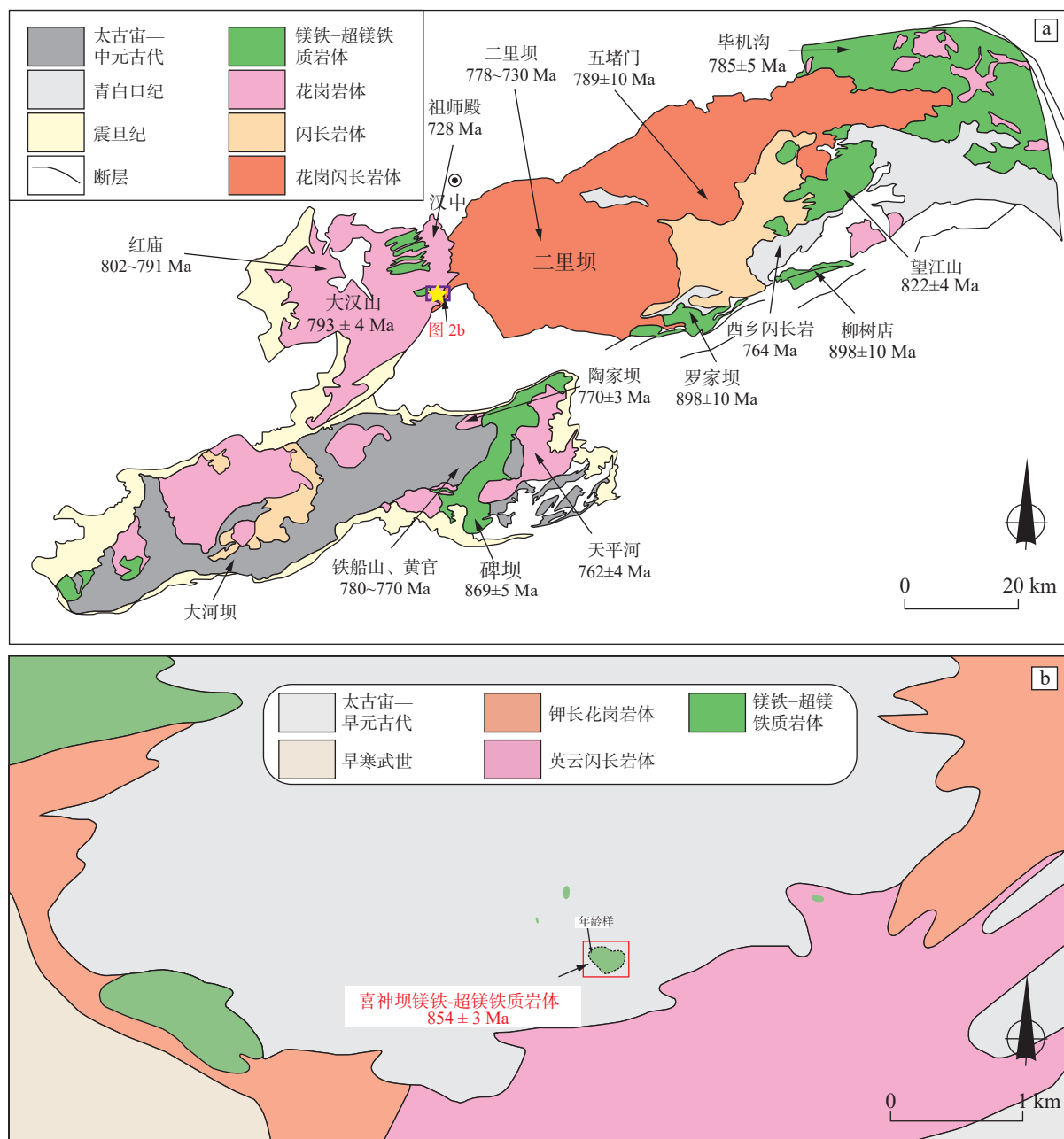


图2 陕西汉南地区新元古代岩浆岩侵入体分布图(a; 据 Dong et al., 2011 修改)、喜神坝矿区地质简图(b; 据陕西省喜神坝幅 1:5 万地质矿产图, 2009)

Fig. 2 (a) Distribution map of Neoproterozoic intrusions in the Hanzhong region, Shaanxi Province, and (b) geological sketch map of the Xishenba mining area

最终定型于印支期—燕山期。区内岩浆岩发育, 岩浆活动主要发生在晋宁期, 岩石类型以基性和中酸性岩侵入岩为主。区域内晋宁期脉岩见于后河岩组、麻窝子组、铁船山组中和中酸性侵入岩中, 脉岩主要有辉绿岩脉、闪长岩脉、煌斑岩脉、花岗岩脉和石英岩脉等。矿区内变质岩主要是后河岩组的中深区域变质岩, 属于角闪岩相, 主要岩石包括片岩、片麻岩、变粒岩(邓奇等, 2024)。

1.3 喜神坝镁铁-超镁铁质岩体及矿体特征

喜神坝铜镍矿化镁铁-超镁铁质杂岩体呈不规则状侵位于太古界—元古界后河组长石石英片岩、二云石英片岩、黑云斜长片麻岩中, 岩体主要由二辉橄榄岩、橄榄二辉岩、辉长岩组成, 出露面积约为 0.08 km²。其中, 二辉橄榄岩具有中-粗粒半自形粒状结构、堆晶结构、包橄结构(图 3a、图 3b)。由橄榄石(40%~45%)、单斜辉石(30%~35%)、斜方辉石(10%~15%)、金属硫化物(约 10%~20%)组成。橄榄石粒径为 4~5 mm, 大部分发生蛇纹石化蚀变, 残余少数橄榄石晶体。单斜辉石粒径为 2~4 mm, 粒度小者充填于橄榄石晶体间隙, 粒度较大者包裹橄榄石。斜方辉石粒径为 2~4 mm; 金属硫化物包括磁黄铁矿、镍黄铁矿与黄铜矿共生。原生硅酸盐矿物结晶顺序为: 橄榄石(Ol)→斜方辉石(Opx)→单斜辉石(Cpx)。

橄榄二辉岩具有中细粒、半自形板柱状-他形粒状结构, 包橄结构(图 3c)。由单斜辉石(约 50%~60%)、斜方辉石(约 10%~15%)、橄榄石(约 10%~20%)、金属硫化物(约 3%~10%)组成, 部分岩石中还含有极少量斜长石、角闪石和黑云母。单斜辉石粒径主要为 0.5~3 mm, 个别可达 5 mm, 部分较大晶体内部包裹橄榄石。斜方辉石粒径为 1~2 mm, 个别可达 3 mm。橄榄石粒径为 0.2~1 mm, 部分晶体沿裂纹出现蛇纹石化蚀变。角闪石呈自形柱状, 粒径为 1~3 mm, 部分发生绿泥石化。斜长石粒径为 0.2~1 mm, 表面发生钠黝帘石化。黑云母呈棕褐色, 多色性明显, 形态为不规则条状, 粒径为 0.2~0.4 mm, 可能为辉石次生蚀变的产物。金属硫化物为磁黄铁矿、镍黄铁矿与黄铜矿。原生硅酸盐矿物结晶顺序为: 橄榄石(Ol)→斜方辉石(Opx)→单斜辉石(Cpx)。

辉长岩具有辉长-辉绿结构, 块状构造(图 3d)。岩石主要由单斜辉石(约 40%~50%)、斜长石(约 20%~30%)、斜方辉石(约 15%~20%)以及少量黑云母(约 2%~7%)和金属硫化物(约 2%~5%)组成。单斜辉石

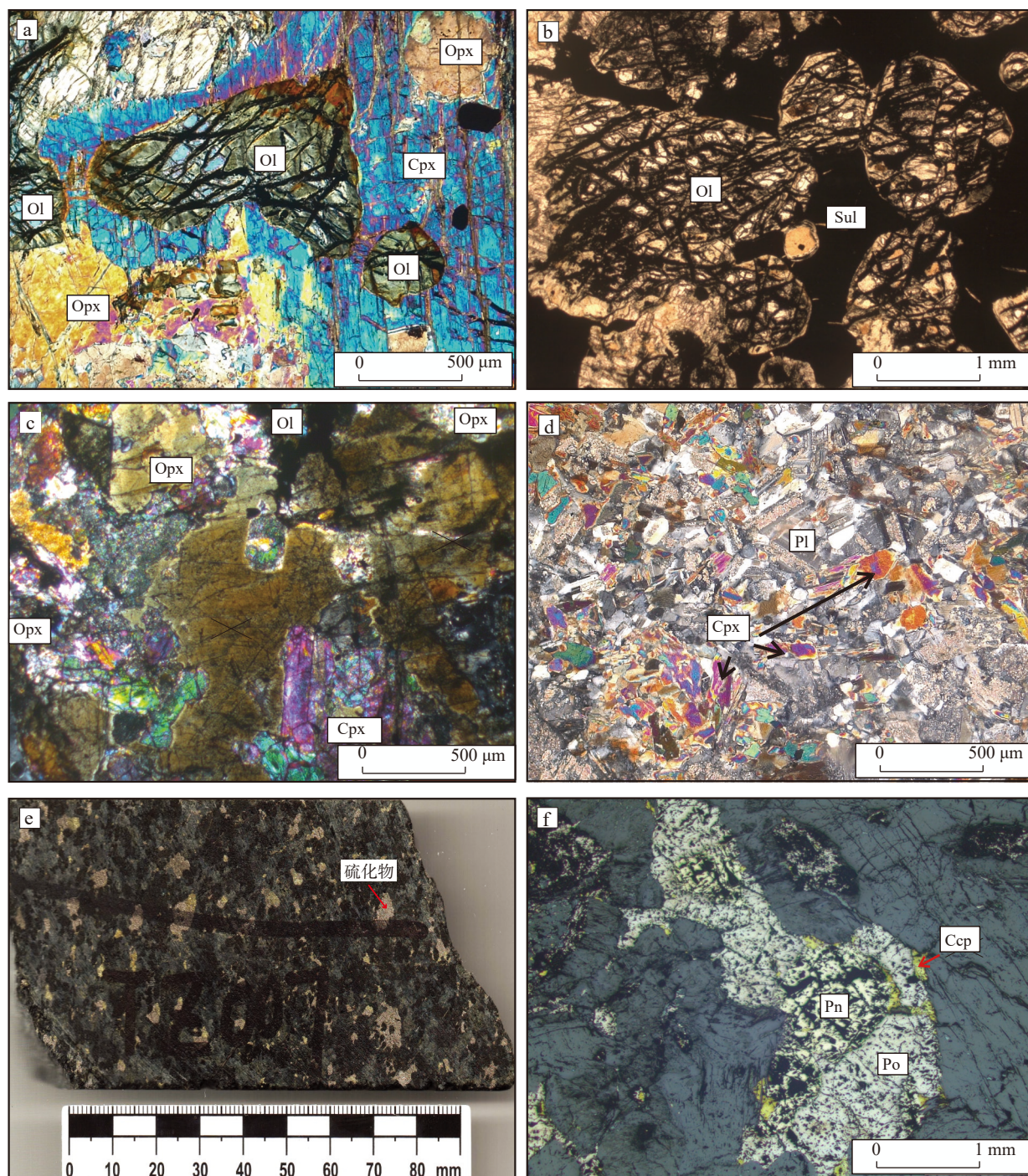
粒径为 0.1~1 mm, 部分晶体发生透闪石化。斜方辉石具自形结构, 粒径为 0.5~1 mm; 斜长石粒径为 0.4~1 mm, 可见聚片双晶, 偶见卡钠复合双晶, 部分发生钠黝帘石化。黑云母为深褐色, 多色性显著, 粒径多见 0.5~1.5 mm。金属硫化物主要为镍黄铁矿与黄铜矿共生。硅酸盐矿物结晶顺序为: 斜方辉石(Opx)→单斜辉石(Cpx)→斜长石(Pl)→黑云母(Bt)。

喜神坝铜镍矿体赋存于橄榄二辉岩与二辉橄榄岩体中, 矿体位于 0 线和 7 线之间(图 4a), 形状为透镜状、囊状、梳状。矿体沿走向长为~300 m, 平均厚度为~18 m。其中硫化物矿物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿(图 3f), 属于典型岩浆铜镍硫化物矿床。浸染状矿石中磁黄铁矿呈他形粒状结构, 颗粒大小为 0.2~2 mm, 个别可达 4 mm。常见镍黄铁矿沿磁黄铁矿的裂隙、节理、晶粒间隙生长或析出于磁黄铁矿外缘形成结状结构, 蚀变产物有黄铁矿、赤铁矿和磁铁矿等。黄铜矿呈他形粒状集合体, 颗粒大小一般为 0.1~0.4 mm。黄铜矿主要以他形粒状集合体产于磁黄铁矿和镍黄铁矿之间。镍黄铁矿呈粒度不一的他形晶集合体, 颗粒大小一般为 0.2~1 mm。常见镍黄铁矿被磁黄铁矿包裹。结晶先后顺序: 磁黄铁矿(Po)→镍黄铁矿(Pn)→黄铜矿(Ccp)。

2 研究方法

2.1 锆石 U-Pb 同位素

喜神坝镁铁-超镁铁岩石中锆石分选和阴极发光照相在廊坊宇能矿岩技术服务公司完成, 锆石 U-Pb 测年在长安大学成矿作用及其动力学实验室应用 LA-ICP-MS 完成。分析仪器为 Agilent 7700X 型四极杆等离子体质谱及配套的 Analyte Excite 193 nm 气态准分子激光剥蚀。激光束斑直径为 35 μm, 频率 5 Hz, 能量密度 5.9 J/cm²。采用高纯度的氩气和氦气作为载气, ²⁰⁴Pb 和 ²⁰²Hg 的背景多小于 100 cps。每个分析数据包括 30 s 的空白信号和 40 s 的数据分析时间。在样品测试之前, 首先用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST610 标样监测仪器, 使得仪器测试分析在精度范围内。每测试 8~10 个样品点, 用 NIST610 与 2 个 91500+Plešovice 监测仪器。采用 ²⁹Si 作为内部元素进行校正, NIST610 作为外标。离线数据处理采用 ICP MS Data Cal 8.0(Liu et al., 2010), 锆石年龄谱和图用 Isoplot 4.15 程序获得, 详细的分析过程 and 数据处理



a. 二辉橄榄岩(包橄结构), 正交偏光; b. 二辉橄榄岩(堆晶结构), 单偏光; c. 橄榄二辉岩, 正交偏光; d. 辉长岩(辉长结构), 正交偏光; e. 浸染状矿石手标本; f. 浸染状矿石, 反射光(Ol.橄榄石; Opx.斜方辉石; Cpx.单斜辉石; Pl.斜长石; Po.磁黄铁矿; Ccp.黄铜矿; Pn.镍黄铁矿)

图3 喜神坝镁铁-超镁铁岩体手标本照片与显微照片

Fig. 3 Hand specimens and photomicrographs of the Xishenba mafic-ultramafic intrusion

方法参见栾燕等(2019)、李艳广等(2023, 2025)。

2.2 锆石 Lu-Hf 同位素

锆石 Lu-Hf 同位素测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室采用 Neptune 多接收离子质谱和

Newwave UP 213 激光剥蚀系统 LA-MC-ICP-MS 完成, 分析点与 U-Pb 测年点的位置一致, 激光剥蚀束斑直径为 40 μm , 剥蚀时间为 26 s, 重复频率为 10 Hz。对 $^{176}\text{Yb}/^{176}\text{Hf}$ 的等压干扰的校正方法见, 分析条件和方法

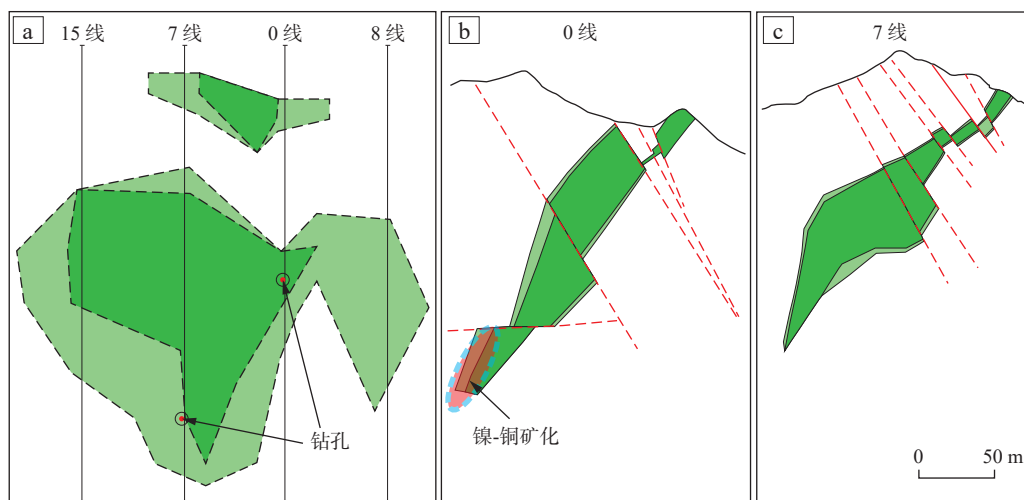


图4 喜神坝铜镍矿化岩体水平投影图(a)和典型勘查线地质剖面图(b、c)

Fig. 4 (a) Horizontal projection map of the Cu-Nimneralized intrusions, and (b, c) geological sections of typical exploration lines at Xishenba deposit

见(Wu et al., 2006)。标准锆石 91 500 和 TEMORA 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测定结果为 $0.282\,296 \pm 0.000\,013$ (2σ) 和 $0.282\,680 \pm 0.000\,013$ (2σ), 在误差范围内与文献报道值一致(Woodhead et al., 2004)。 ^{176}Lu 的衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$, 球粒陨石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分别用 0.033 200 和 0.282 772 来计算锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(Bouvier et al., 2008)。计算亏损地幔趋势线时亏损地幔现代值 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.038 4, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.283 25(Griffin et al., 2002)。

2.3 矿物、岩石地球化学

喜神坝镁铁-超镁铁质岩石中硅酸盐矿物主量元素、全岩主量元素和微量元素的分析工作都在长安大学成矿作用及其动力学实验室完成。硅酸盐矿物主量元素测试时, 挑选自形程度高且蚀变程度弱的橄榄石、辉石矿物颗粒进行分析, 使用仪器为 JEOLJXA-8100 电子探针显微镜, 测试电压为 20 kV, 电流为 20×10^{-8} A, 探针束斑直径为 1 μm , 分析误差为 2%。

主量元素测试方法为 X 射线荧光光谱法(XRF-1 500): 将样品在低温下(105 $^{\circ}\text{C}$)烘干, 先分析其烧失量。随后称取 200 目岩石粉末样品 0.6 g, 加入 6 g 无水高纯四硼酸锂($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), 在玛瑙研钵中混合均匀, 转移到白金坩锅中, 在 TR-1000S 熔炉(SHIMSDZU)中加热至 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 熔样 10 min, 迅速取出混合均匀, 制成玻璃片并编号。采用外标法测定主量元素含量, 分析采用国家一级岩石标样 GBW07101-07114 为基体效应校正, 每 10 个样品带一个标样, 利用标准曲线法校正, 分析误差小于 3%。

微量和稀土元素分析采用 Finnigan Element 型

ICP-MS(电感耦合等离子体质谱仪)完成。首先称取 200 目样品 40 mg, 放入洗净并烘干的 Teflon 溶样罐中, 加入 0.5 ml HNO_3 和 1 ml HF, 超声振荡 10~15 min, 加盖并套上热缩管, 放入不锈钢套中拧紧, 放入烤箱内, 逐渐升温到 200 $^{\circ}\text{C}$, 保温 5 天后将样品从钢套中取出, 在电热板上蒸至近干。加入 2.0 ml (1:1) HNO_3 , 再次套上热缩管和钢套, 盖紧罐盖, 置于 150 $^{\circ}\text{C}$ 烤箱内保温 5 h, 以确保样品全溶, 再将样品溶液转移到 50 ml 容量瓶中, 用 1% HNO_3 稀释至刻度, 摇至均匀, 待测。间隔 10 个待测样品选取一个样作为平行样, 一批样品中带做 1~2 个空白样。用 GRS1、GRS2、GRS3 为标样来进行质量监控, 采用标准曲线法(外标法)来校正, 相对标准偏差一般小于 10%。样品中含量大于 10×10^{-6} 的元素分析误差小于 5%, 含量小于 10×10^{-6} 的样品分析的误差小于 10%。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 同位素

喜神坝赋矿岩石二辉橄榄岩的采样位置为 N 32 $^{\circ}$ 48'49.88", E 106 $^{\circ}$ 52'40.24"。锆石晶体的阴极发光(图 5a)显示少量锆石具清晰的振荡环带结构, 无明显的继承锆石内核, 部分见微裂缝。这些晶体中的 Th 和 U 含量分别为 $88 \times 10^{-6} \sim 735 \times 10^{-6}$ 和 $176 \times 10^{-6} \sim 853 \times 10^{-6}$, Th/U 值大部分大于 0.5(表 1), 表现出岩浆锆石的特性(Hoskin et al., 2003; 向浩予等, 2025; 胡运行等, 2025)。喜神坝侵入体的加权平均锆石 U-Pb 同

位素年龄为(854.1±3.4) Ma, MSWD=1.7(图 5b), 与邻近的毕机沟(785±5) Ma、望江山(822±4) Ma、碑坝岩体(869±5) Ma 等(Wang et al., 2016)和扬子南缘的清明山岩体(848±4) Ma(Zhou et al., 2017)相近。

3.2 锆石 Lu-Hf 同位素

喜神坝二辉橄榄岩中锆石的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282 085~0.282 393, ¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 为 0.036 546~0.152 397, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 为 0.001 078~0.003 803, 根据锆石结晶年龄计算的锆石¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 初始值为 0.282 046~0.282 375,

由于锆石结晶之后没有放射成因¹⁷⁶Hf 的积累(何佳乐等, 2025; 李昊等, 2025), 锆石¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 初始值即代表喜神坝母岩浆的 Hf 同位素初始值, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -6.82~+4.84, 平均值为 -2.52(表 2)。锆石 Hf 同位素两阶段模式年龄 T_{DM2} 为 1 432~2 165 Ma, 多数集中于 ~1 950 Ma。喜神坝岩体的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值明显不同于汉南杂岩中同时代的毕机沟岩体、望江山岩体及碑坝岩体, 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 2.30~7.80、2.70~8.50、1.00~+3.00 (Wang et al.,2016)。

表 1 喜神坝镁铁-超镁铁质岩体中锆石 U-Pb 同位素数据

Tab. 1 Zircon U-Pb isotopic dating data of the Xishenba mafic-ultramafic intrusion

测试点	Pb	²³² Th	²³⁸ U	²³⁸ U/ ²³² Th	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		相关性	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
	(10 ⁻⁶)	(10 ⁻⁶)	(10 ⁻⁶)	比值	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	rho	年龄 (Ma)	1σ
XSB-1	27	100	176	2.282 85	0.068 02	0.003 38	1.326 47	0.062 71	0.141 54	0.002 09	0.313 06	853.4	11.8
XSB-2	83	160	584	4.110 29	0.067 75	0.002 54	1.321 05	0.050 25	0.140 24	0.001 99	0.373 52	846.0	11.3
XSB-3	109	681	631	1.027 32	0.067 09	0.002 22	1.321 76	0.041 98	0.142 27	0.002 09	0.461 83	857.5	11.8
XSB-4	143	735	853	1.278 78	0.067 82	0.002 27	1.344 62	0.046 28	0.142 86	0.001 76	0.358 51	860.8	9.9
XSB-5	98	452	609	1.503 74	0.067 55	0.002 74	1.343 61	0.054 63	0.143 61	0.002 07	0.354 91	865.0	11.7
XSB-6	42	200	258	1.416 07	0.069 47	0.003 13	1.380 56	0.063 21	0.143 10	0.002 34	0.357 77	862.2	13.2
XSB-7	126	700	764	1.200 31	0.069 31	0.002 37	1.368 21	0.048 16	0.141 53	0.001 94	0.389 30	853.3	11.0
XSB-8	70	267	461	1.903 67	0.068 13	0.002 63	1.344 38	0.049 27	0.141 71	0.001 88	0.362 02	854.4	10.6
XSB-9	109	501	714	1.553 97	0.066 04	0.002 19	1.287 02	0.040 51	0.139 58	0.001 95	0.444 46	842.3	11.0
XSB-10	74	88	549	6.929 84	0.066 60	0.002 71	1.309 39	0.050 33	0.140 19	0.002 12	0.393 26	845.8	12.0
XSB-11	85	415	533	1.443 22	0.069 20	0.002 60	1.380 17	0.049 31	0.143 02	0.002 12	0.414 30	861.7	11.9

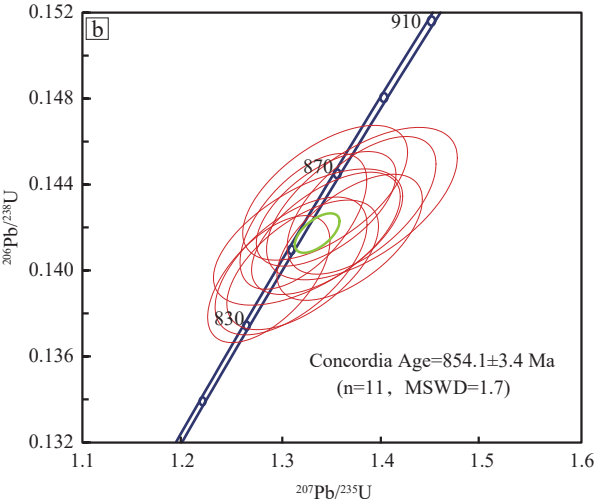
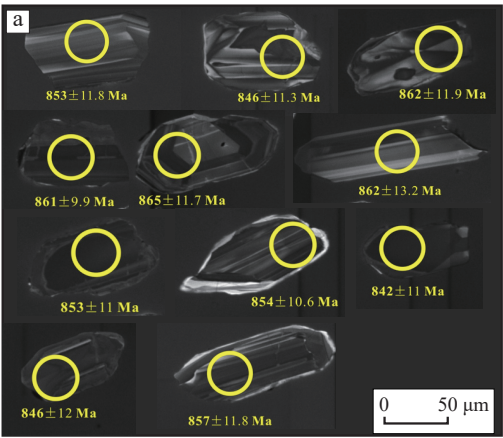


图5 锆石阴极发光图像(a)和锆石 U-Pb 谐和曲线(b)

Fig. 5 (a) Cathodoluminescence (CL) images and (b) U-Pb concordial diagram from zircons

表2 喜神坝镁铁-超镁铁质岩体中锆石 Lu-Hf 同位素数据

Tab. 2 Zircon Lu-Hf isotopic data of the Xishenba mafic-ultramafic intrusion

测点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}	T_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
LH-1	0.099 297	0.002 950	0.282 229	0.282 181	-2.03	1 522	1 866	-0.91
LH-2	0.054 198	0.001 478	0.282 091	0.282 067	-6.07	1 655	2 118	-0.96
LH-3	0.037 961	0.001 077	0.282 279	0.282 261	0.80	1 376	1 687	-0.97
LH-4	0.152 397	0.003 803	0.282 201	0.282 139	-3.52	1 601	1958	-0.89
LH-5	0.036 546	0.001 118	0.282 393	0.282 375	4.84	1 217	1 432	-0.97
LH-6	0.088 446	0.002 599	0.282 258	0.282 216	-0.79	1 464	1 787	-0.92
LH-7	0.122 007	0.003 040	0.282 110	0.282 061	-6.29	1 700	2 132	-0.91
LH-8	0.064 996	0.001 929	0.282 315	0.282 284	1.62	1 356	1 636	-0.94
LH-9	0.103 456	0.002 388	0.282 085	0.282 046	-6.82	1 706	2 165	-0.93
LH-10	0.047 363	0.001 234	0.282 116	0.282 097	-5.01	1 609	2 053	-0.96
LH-11	0.055 368	0.001 461	0.282 137	0.282 114	-4.41	1 590	2016	-0.96

3.3 矿物地球化学

喜神坝岩体二辉橄榄岩中橄榄石以贵橄榄石为主,单斜辉石属于透辉石-普通辉石系列,斜方辉石则以古铜辉石为主,分析数据见表3。喜神坝岩体中橄榄石的Fo值与Ni含量呈现明显的正相关关系(图6),其中橄榄石Fo值为76.0~80.9mol%,类似于相邻的毕机沟岩体下部带堆晶岩的橄榄石的Fo值(74.4~82.4mol%;王洁等,2024)以及中亚造山带南缘喀拉通克赋矿的橄榄苏长岩和斜长方辉橄榄岩中橄榄石Fo值(73.2~81.4mol%;高萍,2011)。喜神坝二辉橄榄岩中橄榄石中Ni含量为 $<200 \times 10^{-6} \sim 1\,445 \times 10^{-6}$,低于相邻毕机沟岩体中橄榄石的Ni含量($1\,006 \times 10^{-6} \sim 1\,658 \times 10^{-6}$;王洁等,2024),类似于喀拉通克矿床中橄榄石Ni含量($526 \times 10^{-6} \sim 1\,727 \times 10^{-6}$;高萍,2011)。

3.4 全岩主量、微量元素

为了精确分析全岩化学组分特征及其变化规律,笔者对神坝岩体全岩主量元素数据进行了100%无水标准化计算(表4)。校正后的 SiO_2 (46.52%~56.17%)、 MgO (8.71%~22.79%)、 Al_2O_3 (4.05%~18.91%)、 CaO (6.80%~16.05%)、 TFe_2O_3 (9.02%~12.75%)。橄榄二辉岩和二辉橄榄岩样品大致分布在橄榄石(Ol)—斜方辉石(Opx)—单斜辉石(Cpx)三端元组分的区域(图7),与橄榄石和辉石的堆晶结构一致。因此,喜神坝全岩主量元素组分代表了具堆晶结构硅酸盐矿物组分,不能直接代表母岩浆组分(Rollinson, 2014)。

喜神坝岩体全岩稀土微量元素数据见表4。微量元素蛛网图(图8a)中辉长岩、橄榄二辉岩、二辉

橄榄岩均具明显的Nb-Ta和Zr-Hf负异常,显示出富集大离子亲石元素(LILE)和亏损高场强元素(HFSE)的特征。辉长岩样品的稀土元素总量为 $28.07 \times 10^{-6} \sim 70.90 \times 10^{-6}$, $(\text{La/Yb})_N$ 值介于2.54~5.66, LREE/HREE的值介于3.23~5.43,显示出明显的轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损的“右倾式”配分模式(图8b)。橄榄二辉岩和二辉橄榄岩样品稀土元素含量为 $12.21 \times 10^{-6} \sim 21.92 \times 10^{-6}$, $(\text{La/Yb})_N$ 值分别为1.61~2.43, LREE/HREE值介于2.04~2.67,均低于辉长岩样品,显示出相对微弱的轻稀土元素富集和重稀土元素亏损,但轻重稀土没有产生明显分异,显示略平坦的“右倾型”配分模式。辉长岩样品轻微的Eu元素正异常,是由于斜长石中相对富集Eu元素导致的,且辉长岩的稀土、微量元素特征与二辉橄榄岩、橄榄二辉岩略有不同,主要由于橄榄石、辉石矿物等堆晶导致的。总体来说,喜神坝岩体中辉长岩与橄榄二辉岩、二辉橄榄岩样品具有相似的稀土、微量元素配分模式,表明其源自于相同的地幔源区,为同源岩浆演化的产物。

喜神坝岩体的稀土、微量元素配分模式类似于全球岛弧玄武岩及相邻的汉南杂岩中同时代的毕机沟、望江山、碑坝镁铁-超镁铁岩体(图8; Zhao et al., 2009b)。此外,喜神坝岩体稀土、微量元素蛛网图特征与扬子克拉通周缘同时代的冷水箐、四堡、清明山等铜镍矿床以及中亚造山带南缘喀拉通克矿床和东昆仑造山带夏日哈木矿床中含矿岩体的微量元素配分形式具有相似特征(Zhu et al., 2007; Zhou et al., 2017;

Zhou et al., 2025)。

4 讨论

4.1 喜神坝岩体成因

喜神坝镁铁-超镁铁质岩石中普遍发育橄榄石的蛇纹石化及辉石的透闪石化,暗示喜神坝岩体经历了后期的热液蚀变作用。本研究选择抗蚀变干扰的高场强元素及稀土元素进行地球化学模拟与示踪,这些元素因具有高离子电位与低流体迁移率,在热液改造过程中活动性较弱 (Sokół K et al., 2022)。喜神坝岩体中所有样品稀土元素都具有轻稀土元素富集的右倾型分布特征,微量元素蛛网图显示大离子亲石元素

富集、高场强元素(Nb-Ta、Zr-Hf)亏损的特征,且喜神坝镁铁-超镁铁岩石具有与全球岛弧玄武岩相似的稀土、微量元素特征(Pearce et al., 1982, 图 8a、图 8b)。在活动大陆边缘,俯冲大洋地壳在高温、高压条件下发生脱水作用,释放的富水体上升渗透至地幔楔中,降低其固相线温度并诱发地幔楔部分熔融,进而形成岛弧玄武质岩浆(Hawkesworth et al., 1993)。富集大离子亲石元素(Rb、K)、亏损高场强元素(Nb-Ta、Zr-Hf)的俯冲流体加入地幔楔使得岛弧玄武岩也展现相同的地球化学特征(Pearce et al., 1995)。因此喜神坝镁铁-超镁铁质岩体具有典型的岛弧玄武质岩浆的特征。

喜神坝岩体中锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-6.82~4.84 表明岩

表 3 喜神坝镁铁-超镁铁质岩体中橄榄石电子探针数据

Tab. 3 Olivine electron microprobe data of the Xishenba mafic-ultramafic intrusion

样品编号	点数	Na ₂ O	MnO	K ₂ O	MgO	FeO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	NiO	CaO	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	Total	Fo	Ni(10 ⁻⁶)
TZ7-7	14	0.03	0.34	0.00	39.99	20.86	0.02	0.01	0.09	0.00	38.94	0.01	0.01	100.29	77.36	726
TZ7-3	4	0.00	0.34	0.00	41.26	19.93	0.02	0.05	0.10	0.04	39.42	0.07	0.01	101.25	78.68	796
TZ7-15	14	0.02	0.36	0.00	40.12	20.55	0.01	0.11	0.09	0.03	38.72	0.03	0.02	100.07	77.69	728
TZ7-17	12	0.02	0.33	0.00	40.90	19.66	0.03	0.01	0.10	0.01	39.24	0.01	0.02	100.33	78.77	789
TZ7-19	14	0.04	0.32	0.00	40.41	20.13	0.02	0.00	0.12	0.01	38.68	0.01	0.01	99.76	78.16	911

注：电子探针数据为每个编号样品n个点的数据取平均值。

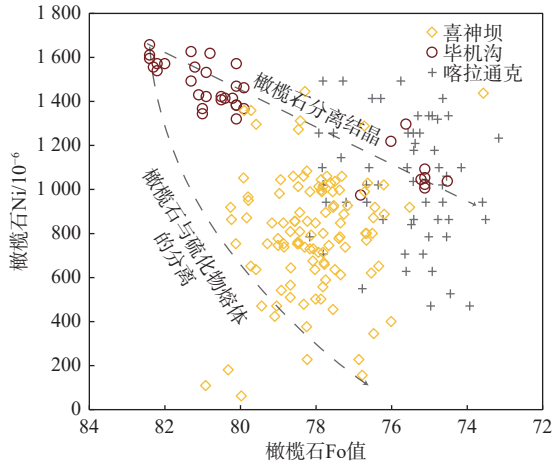
表 4 喜神坝镁铁-超镁铁质岩体主量元素(%)和微量元素数据(10⁻⁶)

Tab. 4 Major element (%) and trace element data (10⁻⁶) of the Xishenba mafic-ultramafic intrusion

岩石类型	辉长岩	辉长岩	辉长岩	橄榄二辉岩	橄榄二辉岩	橄榄二辉岩	二辉橄榄岩	二辉橄榄岩
样品编号	XSB1-4	XSB1-5	XSB1-6	XSB2-1	XSB2-2	XSB2-3	XSB3-1	XSB3-2
SiO ₂	47.38	54.63	50.32	48.37	47.90	43.98	44.97	46.59
TiO ₂	0.41	0.47	0.45	0.41	0.39	0.25	0.33	0.36
Al ₂ O ₃	18.21	7.87	16.99	5.64	5.08	8.24	4.63	3.86
TFe ₂ O ₃	10.91	8.82	8.65	9.40	10.05	12.05	12.01	10.63
MnO	0.15	0.18	0.14	0.14	0.15	0.14	0.16	0.13
MgO	8.39	12.73	8.45	16.29	18.05	18.35	21.55	21.42
CaO	7.32	10.86	6.52	15.48	13.39	10.96	10.20	11.66
Na ₂ O	1.73	0.85	2.75	0.54	0.54	0.38	0.51	0.56
K ₂ O	1.74	0.74	1.51	0.16	0.17	0.15	0.15	0.14
P ₂ O ₅	0.05	0.10	0.07	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03
LOI	2.83	2.11	3.32	3.14	3.34	4.59	5.15	4.08
TOTAL	99.12	99.36	99.17	99.61	99.09	99.70	99.46	99.12
Li	47.41	18.04	68.90	13.36	15.90	26.48	11.69	6.47
Be	0.33	0.72	0.67	0.14	0.11	0.06	0.11	0.10

续表 4

岩石类型	辉长岩	辉长岩	辉长岩	橄榄二辉岩	橄榄二辉岩	橄榄二辉岩	二辉橄榄岩	二辉橄榄岩
Sc	21.22	66.53	25.63	107.07	56.85	35.12	41.90	49.01
Ni	39.28	173.75	34.18	257.25	426.24	1 854.48	741.70	982.91
Cu	161.11	40.00	61.45	184.65	332.52	1 873.10	815.45	1 514.43
Rb	63.49	24.47	49.71	3.68	5.92	3.93	4.96	4.56
Sr	277.44	129.07	277.11	44.62	50.98	81.11	50.81	43.46
Y	7.15	20.51	9.28	9.63	8.82	4.95	6.89	6.88
Zr	26.74	46.73	60.78	21.39	21.73	12.07	21.52	20.72
Nb	1.67	3.29	3.55	0.84	0.84	0.50	0.93	0.83
Cd	0.11	0.12	0.10	0.12	0.11	0.34	0.16	0.17
In	0.02	0.06	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
Cs	10.80	5.82	7.94	0.30	2.20	1.46	2.10	1.93
Ba	275.49	239.37	268.02	29.38	38.39	31.95	39.40	35.83
La	4.88	11.26	8.99	2.38	2.28	1.56	2.46	2.25
Ce	9.76	24.91	17.48	5.52	5.32	3.39	5.35	4.93
Pr	1.18	3.17	2.00	0.78	0.75	0.46	0.70	0.68
Nd	4.90	13.60	7.51	3.81	3.64	2.15	3.23	3.22
Sm	1.14	3.13	1.68	1.19	1.20	0.69	0.94	0.97
Eu	0.92	0.86	0.84	0.46	0.50	0.33	0.39	0.38
Gd	1.39	3.67	1.89	1.59	1.51	0.84	1.25	1.16
Tb	0.22	0.59	0.30	0.30	0.27	0.15	0.21	0.22
Dy	1.36	3.74	1.85	1.91	1.82	1.07	1.39	1.40
Ho	0.28	0.77	0.38	0.40	0.37	0.20	0.27	0.30
Er	0.91	2.30	1.18	1.20	1.04	0.56	0.84	0.82
Tm	0.12	0.32	0.17	0.15	0.15	0.09	0.10	0.12
Yb	0.86	2.24	1.14	1.06	0.96	0.55	0.73	0.73
Lu	0.14	0.32	0.18	0.16	0.14	0.08	0.11	0.11
Hf	0.86	1.64	1.90	0.74	0.74	0.43	0.67	0.64
Ta	0.13	0.25	0.28	0.09	0.08	0.06	0.08	0.07
Pb	5.73	3.55	8.10	1.95	1.59	4.41	1.59	1.82
Bi	0.20	0.07	0.10	0.03	0.08	0.98	0.14	0.11
Th	1.05	2.22	2.64	0.57	0.37	0.31	0.49	0.49
U	0.21	0.46	0.59	0.13	0.09	0.07	0.11	0.14
ΣREE	28.07	70.90	45.60	20.93	19.93	12.13	17.98	17.28
LREE	22.78	56.94	38.50	14.15	13.69	8.58	13.07	12.43
HREE	5.29	13.96	7.10	6.78	6.24	3.55	4.90	4.85
LREE/HREE	4.31	4.08	5.43	2.09	2.19	2.42	2.67	2.56
(La/Yb) _N	4.09	3.61	5.66	1.61	1.71	2.02	2.43	2.20
Th/Yb	1.23	0.99	2.32	0.54	0.39	0.56	0.67	0.67
Nb/Yb	1.95	1.47	3.11	0.79	0.88	0.90	1.28	1.13



毕机沟侵入体的橄榄石数据来自(王洁等, 2024)

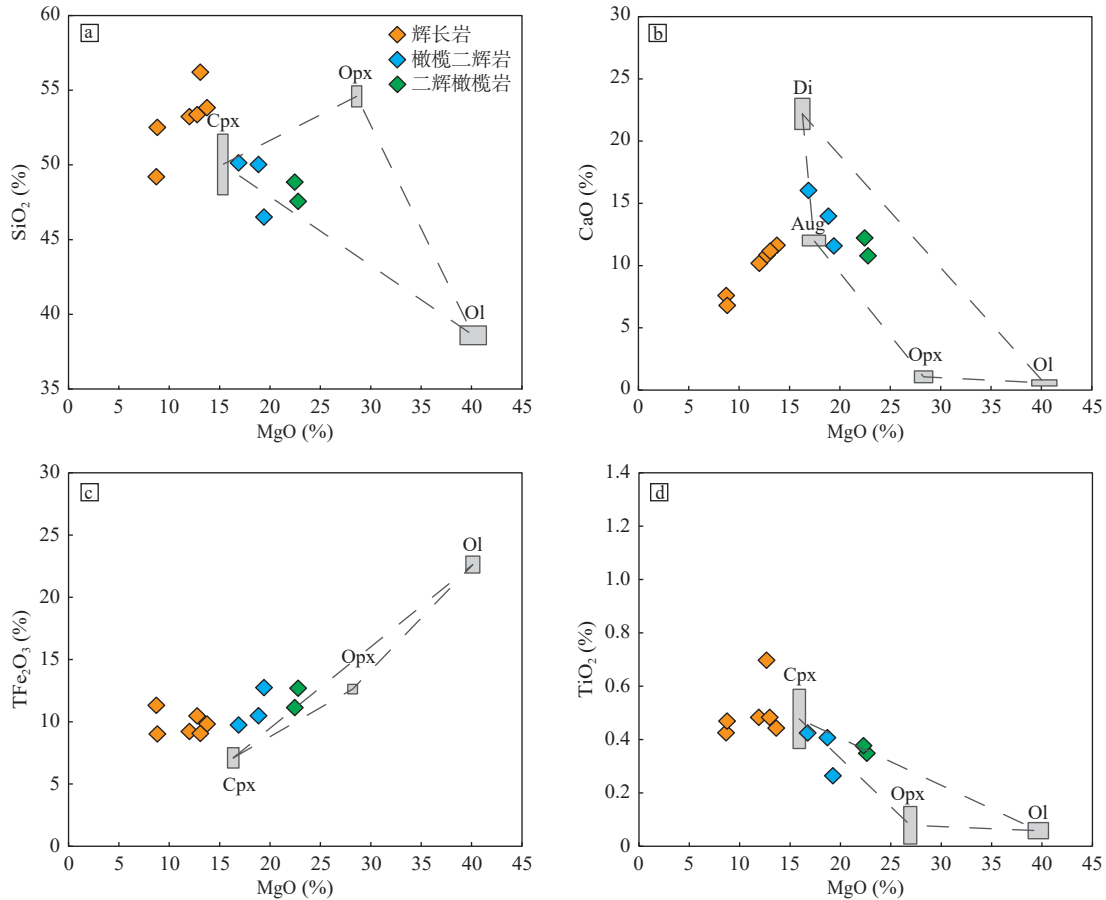
图6 喜神坝岩体二辉橄榄岩中的橄榄石 Fo-Ni 相关图

Fig. 6 Olivine Fo-Ni correlation diagram in Iherzolite from the Xishenba intrusion

浆源区为亏损地幔, 且岩浆遭受了一定程度的地壳混染。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $t(\text{Ma})$ 相关图中, 亏损地幔 $\varepsilon_{\text{Hf}}(854 \text{ Ma})$

值为 13.50, Hf 含量为 0.80×10^{-6} (Sun et al., 1989), 扬子北缘地壳 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -18.50, Hf 含量为 3.00×10^{-6} (Qiu et al., 2018)。壳-幔双端元 Hf 同位素混合模拟计算结果显示喜神坝母岩浆地壳混染程度介于 10%~30% (图 9a), 在 Th/Yb 和 Nb/Yb 相关图中, 喜神坝岩体位于大陆岛弧玄武岩区域内, 选用汉南杂岩中未发生地壳混染作用的毕机沟镁铁-超镁铁质岩体样品为地幔端元组分 ($\text{Nb}=1.03 \times 10^{-6}$, $\text{Th}=0.10 \times 10^{-6}$, $\text{Yb}=1.12 \times 10^{-6}$, $\text{Nb/Yb}=0.92$, $\text{Th/Yb}=0.09$) (Zhao et al., 2009b), 汉南地区崆岭 TTG 片麻岩为地壳组分 ($\text{Nb}=5.00 \times 10^{-6}$, $\text{Th}=6.00 \times 10^{-6}$, $\text{Yb}=0.60 \times 10^{-6}$, $\text{Nb/Yb}=0.89$, $\text{Th/Yb}=10.00$) (Qiu et al., 2018), 壳-幔两端元模拟计算同样表明喜神坝岩浆演化过程中经历了 10%~25% 的地壳物质混染 (图 9b)。与其相比, 汉南杂岩中毕机沟、望江山、碑坝等同时期的镁铁-超镁铁质岩体均没有经历明显的地壳污染 (Zhao et al., 2009b)。

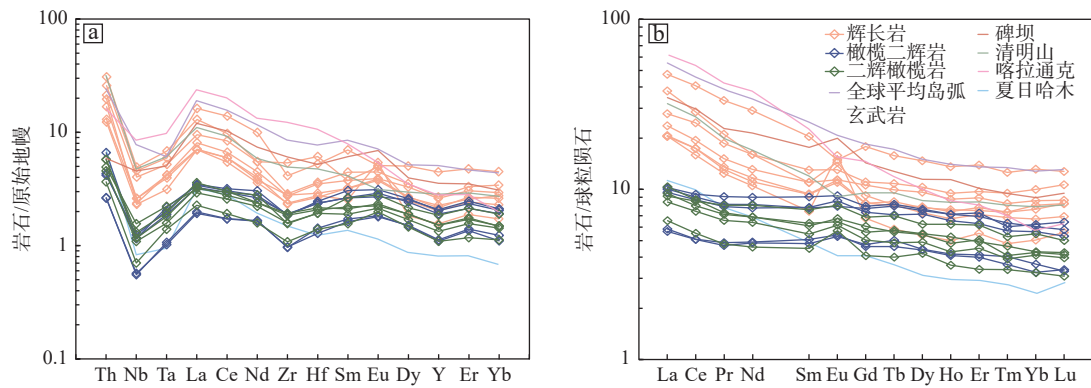
前人研究表明, 罗迪尼亚超大陆形成于新元古代



矿物缩写: Ol.橄榄石; Opx.斜方辉石; Cpx.单斜辉石; Di.透辉石; Aug.普通辉石

图7 喜神坝镁铁-超镁铁质岩体全岩主量元素与 MgO 相关图

Fig. 7 Plots of Oxides Versus MgO Contents in Whole-Rock Compositions of the Xishenba Mafic-Ultramafic Intrusion



球粒陨石和原始地幔标准值据(Sun et al., 1989); 全球平均岛弧玄武岩数据来自(杨婧等, 2016); 碑坝岩体的数据来自(Zhao et al., 2009b); 清明山矿体的数据来自(Zhou et al., 2017); 喀拉通克矿体的数据来自(Duan et al., 2017); 夏日哈木矿体数据来自(姜常义等, 2015)

图8 微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化蛛网图(b)

Fig. 8 (a) Primitive mantle-normalized trace element spider diagram and (b) chondrite-normalized rare earth element (REE) spider diagram

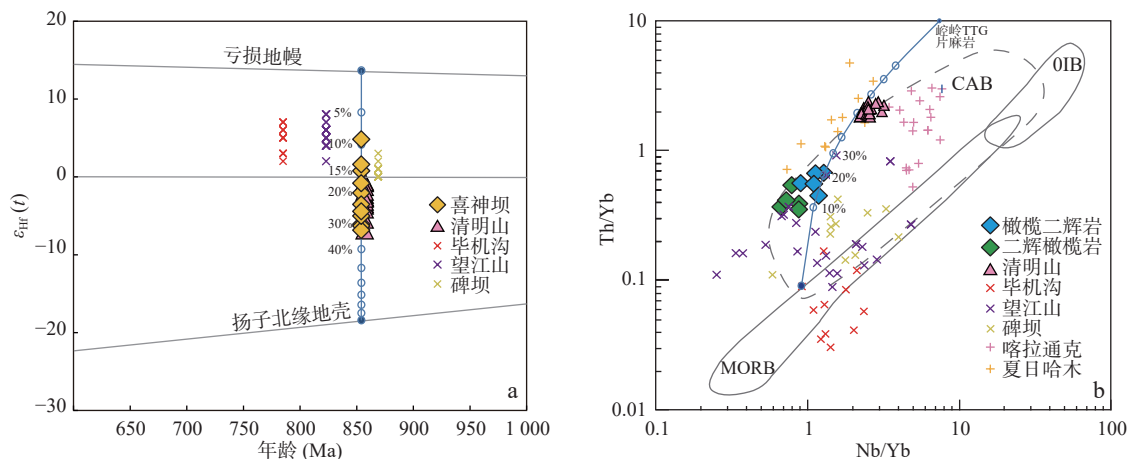


图 a 毕机沟、望江山、碑坝的数据来自(Wang et al., 2016), 满洞地苏岩体(清明山)的数据来自; 图 b 底图引自(Pearce, 2008), MORB-OIB 阵列的数据来自(Pearce, 2008); 毕机沟、望江山、碑坝的数据来自(Wang et al., 2016); 清明山数据来自(Zhou et al., 2017)

图9 锆石年龄- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 相关图解(a)和微量元素 Th/Yb-Nb/Yb 相关图(b)

Fig. 9 (a) Zircon age versus $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ correlation diagram and (b) Th/Yb vs. Nb/Yb trace element ratio diagram

早期, 在新元古代晚期裂解(Li et al., 2008; Cawood et al., 2016)。关于汉南地区新元古代晚期的构造背景, 敖文昊等(2014)提出汉南杂岩中祖师店 I 型花岗质岩体(728±3) Ma 是由新生玄武质洋壳俯冲消减过程中在含水条件下部分熔融形成的, 代表洋内非成熟岛弧向成熟岛弧转化阶段的产物; Zhao et al.(2008)通过对五堵门和二里坝花岗闪长岩(~735 Ma)的地球化学数据分析, 认为花岗质岩浆形成于大洋板块的俯冲过程; Ao et al.(2019)通过对汉南地区的大汉山辉长岩花岗岩(793~779 Ma)地球化学研究同样认为汉南杂岩形成于新元古代与俯冲相关的岛弧背景, 因此扬子克拉通北缘汉南地区在新元古代晚期处于洋壳俯冲背

景。此外, 汉南杂岩中与喜神坝同时形成的镁铁-超镁铁质岩体, 如毕机沟(785±5) Ma、望江山(822±4) Ma、碑坝(869±5) Ma 等也被认为形成于岛弧俯冲背景(Zhao et al., 2009b; Wang et al., 2016)。因此, 喜神坝镁铁-超镁铁质岩体形成于汇聚背景, 俯冲流体交代地幔楔形成的岛弧玄武质岩浆作用。

4.2 喜神坝铜-镍矿体成因

已有研究表明喜神坝镁铁-超镁铁岩体与汉南杂岩中其他同时代的镁铁-超镁铁岩体形成于相同的构造-岩浆动力学背景。笔者选择不含铜镍矿化的毕机沟超镁铁质堆晶岩中橄榄石 Fo-Ni 变化趋势线代表汉南地区新元古代晚期玄武质岩浆橄榄石分离结晶的

趋势线。与其相比,喜神坝二辉橄榄岩中橄榄石 Ni 含量较低(图 6)。已有研究表明, Mg 和 Ni 在橄榄石中为相容元素, Fe 具有较弱的相容性, 因此玄武质岩浆早期结晶的橄榄石具有高的 Fo 值($MgO/(MgO+FeO)$)。随着玄武质岩浆的演化, 残余岩浆中将会相对富铁贫镁, 同时岩浆中 Ni 含量也逐渐降低。因此, 橄榄石中 Fo 值和 Ni 含量都逐渐降低, 两者呈正相关关系。如果橄榄石结晶过程中发生硫化物熔离, 由于 Ni 在硫化物熔体-岩浆之间的分配系数远大于橄榄石晶体-岩浆之间的分配系数, 岩浆中大量的 Ni 将会进入硫化物熔体中, 使的橄榄石晶体中 Ni 含量急剧降低, 因此与硫化物熔体共结的橄榄石晶体的 Fo 值与 Ni 含量虽然也为正相关关系, 但是橄榄石中 Ni 含量要远远低于正常分离结晶形成的橄榄石晶体(毛亚晶等, 2024)。因此, 喜神坝镁铁-超镁铁质岩体中出现的浸染状铜镍硫化物矿石以及二辉橄榄岩中橄榄石的 Fo-Ni 相关性特征表明喜神坝母岩浆演化过程中曾发生了硫化物的熔离。

岩浆铜镍硫化物矿床形成的首要条件是岩浆演化过程中发生硫化物的熔离, 即岩浆中的硫含量超过岩浆中硫的溶解度(Ripley et al., 2013)。Naldrett(2011)在总结全球岩浆铜镍硫化物矿床成矿特征基础上, 提出幔源岩浆发生硫化物熔离的主要机制包括: 不同性质岩浆混合、岩浆结晶分异和岩浆演化过程中发生地壳物质的混染作用(Li et al., 2000; Ripley et al., 2013)。成矿过程可能受其中一个因素控制, 也可能受几个因素控制。已有研究表明扬子克拉通北缘毕机沟、碑坝、望江山等不含矿的镁铁-超镁铁质岩体于喜神坝铜镍矿化岩体形成于相同的大地构造背景以及相同的岩浆源区, 但这些岩体岩浆侵位过程基本没有经历大量的同化混染作用(Zhao et al., 2009b; Wang et al., 2016), 而喜神坝岩体经历了 10%~30% 的地壳混染。此外, Zhu et al.(2007)通过对扬子克拉通西缘的冷水箐矿床(821 ± 1)Ma 的微量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素的研究, 证实了形成该矿床的原始岩浆遭受了不同程度的地壳混染作用(5%~27%); Zhou et al.(2017)对扬子克拉通南缘清明山镁铁质侵入体(848 ± 4)Ma 使用 $(Th/Nb)_N$ 和 $(Th/Yb)_N$ 等微量元素比值进行混染程度的模拟计算, 得出母岩浆经历了 10%~20% 地壳污染, 且支持清明山侵入体是岛弧玄武质岩浆作用的产物; Zhou et al.(2025)用同样的方法对扬子克拉通南缘四堡铜镍硫化物矿床(838 ± 4)Ma 进行计算得到 10%~20% 的同

化混染程度; 曾威等(2016)利用 Nd 同位素估算得到扬子北缘周庵铜镍铂族矿床(621 ± 2) Ma 受到 ~19% 的地壳物质的混染作用。因此喜神坝岩体 10%~30% 的地壳混染程度可能是促使岩浆发生硫化物熔离的重要因素。

4.3 铜镍成矿潜力分析

喜神坝铜镍矿床成矿特征与扬子克拉通周缘新元古代铜镍矿床具有显著可比性(表 5)。前人研究表明, 扬子克拉通西缘冷水箐铜镍矿体(821 ± 2) Ma 中硫化物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿, 赋存在二辉橄榄岩、橄榄二辉岩岩体中, 赋矿岩体富集轻稀土元素和亏损 Nb、Ta 等元素, 表明该矿床岩浆源自亏损地幔, 遭受了 5%~27% 的地壳混染作用, 发生了硫化物熔离(Zhu et al., 2007; 苟体忠等, 2010; 姚俊华, 2019)。扬子克拉通南缘四堡铜镍矿体(838 ± 4) Ma 中硫化物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿和黄铁矿, 赋存在辉石岩中, 原始岩浆来自富集地幔源, 遭受了 10%~20% 的地壳混染作用, 发生硫化物熔离(Zhou et al., 2025); 喜神坝与冷水箐、四堡均位于扬子克拉通边缘, 硫化物矿体均位于超镁铁质岩相中, 具有相似的硫化物矿物组合, 且赋矿岩浆均来自被俯冲流体交代的地幔源, 都经历了较高级度的地壳混染, 具有相似的成岩成矿过程, 因此喜神坝岩体也具有良好的铜镍成矿潜力。

此外, 喜神坝铜镍矿床与典型汇聚背景下铜镍矿床(如东昆仑夏日哈木矿床及中亚造山带南缘喀拉通克矿床)具有相似的地质地球化学特征(表 5), 表明其具有良好的铜镍成矿潜力。在赋矿岩相方面, 夏日哈木矿床主要赋矿岩相为辉石岩, 喀拉通克矿床为橄榄苏长岩和苏长岩, 喜神坝岩体的赋矿岩石为二辉橄榄岩和橄榄二辉岩。矿石类型上, 喜神坝、夏日哈木和喀拉通克矿床都具有典型的岩浆型矿石特征, 包括块状和海绵陨铁状矿石, 硫化物组合均以磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿为主。地球化学特征上, 这些矿床均显示富集轻稀土元素和大离子亲石元素、亏损高场强元素 Nb-Ta 等典型的岛弧玄武质岩浆特征, 表明岩浆源区曾遭受俯冲流体的交代作用。此外, 岩浆演化过程中均遭受较高级度的地壳混染作用, 如夏日哈木和喀拉通克的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值分别为 1.00~5.00 和 9.00~16.00, 指示其原始岩浆来自亏损地幔并遭受一定程度地壳混染, 而喜神坝岩体的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(-6.82~+4.84)同样指示其源于亏损地幔, 但更低的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值反映有更多地壳

表 5 汇聚背景下铜镍矿矿床特征对比

Tab. 5 Characteristics of Cu-Ni Ore Bodies on the periphery of the Yangtze Craton and in convergent settings

矿床名称	品位	构造背景	赋矿岩相	矿石类型	矿物组合	围岩特征	成矿时代	地化特征	参考文献
喜神坝铜镍矿床	Ni品位 0.79(%) Cu品位 1.42(%)	扬子北缘板 块汇聚背景	二辉橄榄岩 橄榄二辉岩	浸染状矿石 块状矿石	磁黄铁矿、 镍黄铁矿、 黄铜矿	太古界—古元古界后河组长石石英片岩、二厂石英片岩、黑云斜长片岩	(854±3) Ma	岛弧玄武岩地球化学特征, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值-6.82~4.84, 地壳混染程度 10%~30%; 橄榄石Fo值76~81 mol%	本文
冷水菁铜镍矿床	镍品位 0.92(%) 铜品位 0.31(%)	扬子西缘板 块汇聚背景	二辉橄榄岩 橄榄二辉岩	浸染状矿石 块状矿石	磁黄铁矿、 镍黄铁矿、 黄铜矿	中元古代延边群变质火山岩、片岩	(821±2) Ma	岛弧玄武岩地球化学特征, 母岩浆来自俯冲流体交代的亏损地幔, 地壳混染程度 5%~27%	(Zhu et al., 2007; 苟体忠等, 2010; 姚俊华, 2019)
四堡铜镍矿床	镍品位 0.54(%) 铜品位 0.32(%) 钴品位 0.026(%)	扬子南缘板 块汇聚背景	辉石岩	浸染状矿石	磁黄铁矿、 镍黄铁矿、 黄铜矿、黄铁矿	新元古代四堡群砂岩、粉砂岩、泥岩	(838±4) Ma	岛弧玄武岩地球化学特征, 母岩浆来自富集的、俯冲流体交代的岩石圈地幔, 地壳混染程度 10%~20%	(Zhou et al., 2025)
喀拉通克铜镍矿床	镍品位 0.88(%) 铜品位 1.39(%)	中亚造山带南缘	橄榄苏长岩、 苏长岩	浸染状矿石 致密块状矿石	磁黄铁矿、 镍黄铁矿、 黄铜矿	石炭纪板岩、互层凝灰岩	(287±5) Ma	岛弧玄武岩地球化学特征, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值9.00~16.00, 地壳混染程度~15%; 橄榄石Fo值73~81 mol%	(高萍, 2011; Duan et al., 2017)
夏日哈木铜镍矿床	镍品位 0.65(%) 铜品位 0.14(%) 钴品位 0.013(%)	东昆仑造山带	橄榄岩、辉石岩	稠密浸染状矿石、块状矿石	磁黄铁矿、 镍黄铁矿、 黄铜矿	前寒武系变质岩、黑云母片岩、富石英片岩、石英岩、大理岩和片麻岩	(423±1) Ma	岛弧玄武岩地球化学特征, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值1.00~5.00, 地壳混染程度~15%; 橄榄石Fo值84~90 mol%	(王冠等, 2014; Li et al., 2015)

物质的加入。前人研究已表明,在夏日哈木和喀拉通克矿床中,地壳混染是促使硫化物熔离的关键因素(Li et al., 2015; Duan et al., 2017),高程度地壳混染作用同样促使喜神坝岩体发生了硫化物的熔离作用。综上所述,喜神坝铜镍矿床与扬子周缘新元古代铜镍矿体以及汇聚背景下的典型铜镍矿床具有相似的成岩成矿特征,表明喜神坝铜镍矿床及扬子北缘同类型的镁铁-超镁铁质岩体也具有较好的铜镍成矿潜力。

5 结论

(1)喜神坝镁铁-超镁铁质岩体形成时间为(854.1±3.4)Ma,地球化学特征表明其形成于洋壳俯冲

背景下亏损地幔部分熔融产生的玄武质岩浆。

(2)喜神坝原始岩浆演化过程中同化混染了10%~30%地壳物质,导致岩浆发生硫化物熔离并形成铜镍矿体。

(3)汇聚背景下典型岩浆矿床对比表明喜神坝铜镍矿床及扬子北缘同类型镁铁-超镁铁质岩体都具有较好的铜镍成矿潜力。

致谢: 本文实验测试得到了长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室刘民武、王柱命、谭细绢、栾燕和杜金花老师大力支持和帮助。感谢中国科学院地质与地球物理研究所毛亚晶副研究员对论文提出的宝贵意见,感谢审稿专家悉心审稿并提出了许多宝贵的意见和建议。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 艾启兴, 张照伟, 谭文娟, 等. 青海省东昆仑岩浆镍钴矿床成矿差异性分析: 以夏日哈木和石头坑镍矿床为例[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 41–55.
- AI Qixing, ZHANG Zhaowei, TAN Wenjuan, et al. Analysis of Metallogenic Differences in Magmatic Ni-Co Deposits in the East Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province: A Case Study of the Xiarihamu and Shitoukengde Deposits[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 41–55.
- 敖文昊, 张宇昆, 张瑞英, 等. 新元古代扬子北缘地壳增生事件: 来自汉南祖师庙奥长花岗岩地球化学、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据[J]. 地质论评, 2014, 60(6): 1393–1408.
- AO Wenhao, ZHANG Yukun, ZHANG Ruiying, et al. Neoproterozoic Crustal Accretion of the Northern Margin of Yangtze Plate: Constrains from Geochemical Characteristics, LA-ICP-MS Zircon U-Pb Chronology and Hf Isotopic Compositions of Trondhjemite from Zushidian Area, Hannan Region[J]. Geological Review, 2014, 60(6): 1393–1408.
- 陈阳阳, 段俊, 徐刚, 等. 甘肃北山地区晚三叠世煌斑岩地球化学特征及构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 78–94.
- CHEN Yangyang, DUAN Jun, XU Gang, et al. Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Late Triassic Lamprophyre in the Beishan Region, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 78–94.
- 邓奇, 汪正江, 丛峰, 等. 扬子陆块西北缘米仓山地区新元古代早期沉积盆地演化: 沉积序列与锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 地质学报, 2024, 98(11): 3354–3367.
- DENG Qi, WANG Zhenghong, CONG Feng, et al. Early Neoproterozoic Sedimentary Basin Evolution in the Micangshan Area on The Northwestern Margin of The Yangtze Block: Evidence from Sedimentary Sequences and Zircon U-Pb Geochronology[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(11): 3354–3367.
- 段俊, Teuku Amrul Mahdi, 王宁, 等. 金川铜镍矿床多硫同位素和铁同位素特征及成因意义[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 56–68.
- DUAN Jun, Teuku Amrul Mahdi, WANG Ning, et al. Characteristics and Genetic Implications of Multiple Sulfur and Iron Isotopes in the Jinchuan Cu-Ni Deposit[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 56–68.
- 高萍. 新疆喀拉通克铜镍矿矿物特征研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- GAO Ping. Study on Mineral Characteristics of the Kalatongke Cu-Ni Sulfide Deposit, Xinjiang[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- 高山, 张本仁. 扬子地台北部太古宙 TTG 片麻岩的发现及其意义[J]. 地球科学, 1990, 15(6): 675–679.
- GAO Shan, ZHANG Benren. The Discovery of Archean TTG Gneisses in the Northern Yangtze Platform and Their Implications[J]. Earth Science, 1990, 15(6): 675–679.
- 苟体忠, 钟宏, 朱维光, 等. 川西冷水箐 Cu-Ni 硫化物矿床的 PGE 和 Re-Os 同位素地球化学特征及成矿意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3363–3374.
- GOU Tizhong, ZHONG Hong, ZHU Weiguang, et al. Geochemical characteristics of platinum-group elements and Re-Os isotope of the Lengshuiqing Cu-Ni sulfide deposit in western Sichuan Province and implications for mineralization.[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(11): 3363–3374.
- 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.
- 何佳乐, 唐卫东, 刘天航, 等. 龙首山构造带罗城花岗闪长岩地质年代学、岩石成因和构造背景研究[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 52–67.
- HE Jiale, TANG Weidong, LIU Tianhang, et al. Study on Geochronology, Rock Genesis and Tectonic Background of Luo Cheng Granodiorite in Longshou Mountain Tectonic Belt[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 52–67.
- 胡运行, 顾枫华, 章永梅, 等. 新疆别珍套山西段中酸性侵入岩岩石成因: 来自岩石地球化学、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素的制约[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 99–122.
- HU Yunhang, GU Fenghua, ZHANG Yongmei, et al. Petrogenesis of Intermediate-acidic Intrusive Rocks in the Western Part of Biezhentao, Xinjiang: Constraints from Petrogeochemistry, Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 99–122.
- 李昊, 杜文强, 张超, 等. 藏北卡易错地区晚侏罗世花岗闪长岩形成时代、地球化学特征及其地质意义[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 81–92.
- LI Hao, DU Wenqiang, ZHANG Chao, et al. Formation Age, Petrogenesis and Geological Significance of Late Jurassic Granodiorites in Kayico Area, Northern Tibet[J]. Northwestern Geology,

- 2025, 58(1): 81–92.
- 李文渊, 高永宝, 张照伟, 等. 镁铁—超镁铁质岩与花岗岩-伟晶岩“小岩体成大矿”对比——以昆仑成矿带夏日哈木和大红柳滩超大型矿床为例[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(5): 1036–1048.
- LI Wenyuna, GAO Yongbao, ZHANG Zhaowei, et al. Comparison of Mafic-ultramafic and Granite-pegmatite “Small Intrusion Forming Large Deposit” —Taking Xiarihamu and Dahongliutan Super-large Deposits in Kunlun Metallogenic Belt, China as Examples[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(5): 1036–1048.
- 李艳广, 靳梦琪, 汪双双, 等. LA-ICP-MS U-Pb 定年技术相关问题探讨[J]. 西北地质, 2023, 56(4): 274–282.
- LI Yanguang, JIN Mengqi, WANG Shuangshuang, et al. Exploration of Issues Related to the LA-ICP-MS U-Pb Dating Technique[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(4): 274–282.
- 李艳广, 霍金晶, 孙国超. 岩石薄片原位磷灰石 U-Pb 定年技术探讨: 超基性岩年代学分析的新视角[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 197–206.
- LI Yanguang, HUO Jinjing, SUN Guochao. Rock Thin Section Scale In-Situ Apatite U-Pb Dating Technique Discussion: A New Perspective on Ultramafic Rock Geochronology Analysis[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 197–206.
- 栾燕, 何克, 谭细娟. LA-ICP-MS 标准锆石原位微区 U-Pb 定年及微量元素的分析测定[J]. 地质通报, 2019, 38(7): 1206–1218.
- LUAN Yan, HE Ke, TAN Xijuan. In situ U- Pb dating and trace element determination of standard zircons by LA- ICP- MS[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(7): 1206–1218.
- 毛亚晶, 吴石头, 贾丽辉, 等. 橄榄石微量元素: 分析、地球化学行为与地球科学应用[J]. 岩石学报, 2024, 40(10): 3160–3190.
- MAO Yajing, WU Shitou, JIA Lihui, et al. Trace elements in olivine: Analysis, geochemical behavior, and case studies[J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(10): 3160–3190.
- 陕西省地质调查院. 中国区域地质志-陕西志[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- 宋谢炎, 邓宇峰, 颀炜. 成矿带尺度岩浆通道成矿系统的构建及其找矿意义——以新疆黄山—镜儿泉成矿带为例[A]. 第十届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集[C]. 2023.
- 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 岩浆硫化物矿床勘查研究的趋势与小岩体成矿系统[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(1): 1–9.
- TANG Zhongli, QIAN Zhuangzhi, JIANG Changyi, et al. Trends of Research in Exploration of Magmatic Sulfide Deposits and Small Intrusions Metallogenic System[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(1): 1–9.
- 王冠, 孙丰月, 李碧乐, 等. 东昆仑夏日哈木铜镍矿镁铁质-超镁铁质岩体岩相学, 锆石 U-Pb 年代学, 地球化学及其构造意义[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 381–401.
- WANG Guan, SUN Fengyue, LI Bile, et al. Petrography, zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the mafic-ultramafic intrusion in the Xiarihamu Cu-Ni deposit from East Kunlun, with implications for geodynamic setting[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(6): 381–401.
- 王建明, 陈衍景, 李胜利, 等. 河南周庵铂族-铜镍矿床的地质特征及成因分析[J]. 矿物岩石, 2006, 26(3): 31–37.
- WANG Jianming, CHEN Yanjing, LI Shengli, et al. Geology and Genesis of The ZHOU 'AN PGE-CU-NI Deposit, Henan Province[J]. Mineral Petrol, 2006, 26(3): 31–37.
- 王洁, 李中州, 王梦玺. 扬子地块北缘毕机沟岩体下部带堆晶岩结构定量化分析: 对层状岩体冷却早期粒间熔体排出机制的约束[J]. 地质学报, 2024, 98(7): 2110–2127.
- WANG Jie, LI Zhongzhou, WANG Mengxi. Quantitative textural analysis of cumulates from the lower zone of the Bijigou intrusion in the northern margin of the Yangtze Block: Constraints on the expulsion mechanism of interstitial liquid at the early stage of solidification of layered intrusions[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(7): 2110–2127.
- 王亚磊, 李文渊, 王永才, 等. 金川超大型铜镍矿床IV矿区矿体成因及成矿过程[J]. 西北地质, 2025, 58(6): 220–232.
- WANG Yalei, LI Wenyuan, WANG Yongcai, et al. Genesis and Ore-Forming Process of the No. IV Intrusion of Jinchuan Super-Large Ni-Cu Magmatic Sulfide Deposit[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(6): 220–232.
- 向浩予, 刘松, 康波, 等. 班公湖-怒江成矿带西段白板地北部晚侏罗世花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 年龄、微量元素组成及地质意义[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 43–51.
- XIANG Haoyu, LIU Song, KANG Bo, et al. Geochronology and Trace Element Compositions of Zircon in Granodiorite in North Baibandi Area, Western Bangong-Nujiang Metallogenic Belt and Their Geological Significance[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 43–51.
- 杨婧, 王金荣, 张旗, 等. 全球岛弧玄武岩数据挖掘——在玄武岩判别图上的表现及初步解释[J]. 地质通报, 2016, 35(12): 1937–1949.
- YANG Jing, WANG Jinrong, ZHANG Qi, et al. Global IAB data excavation: The performance in basalt discrimination diagrams and preliminary interpretation[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(12): 1937–1949.
- 姚俊华. 扬子地块西缘新元古代冷水箐和高家村镁铁-超镁铁质岩体的成因及其 Cu-Ni 成矿作用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.

- YAO Junhua. Genesis of Neoproterozoic Lengshuiqing and Gaojiacun Mafic-Ultramafic Intrusions in the Western Margin of the Yangtze Block and Their Cu-Ni Mineralization[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- 张愿宁, 徐刚, 王富贵, 等. 新疆东天山黄山地区岩浆铜镍矿床特征对比及找矿启示[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 102–117.
- ZHANG Yuanning, XU Gang, WANG Fugui, et al. Comparison of Magmatic Cu-Ni Deposits in Huangshan Area, East Tianshan and Its Implications for Prospecting[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 102–117.
- 赵达成, 王美乐, 李章志贤, 等. 夏日哈木岩浆硫化物矿床中钴和镍关键金属的赋存状态及分布规律[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 17–40.
- ZHAO Dacheng, WANG Meile, LI Zhangzhixian, et al. The Occurrence and Distribution of Cobalt and Nickel Key Metals in the Xiarihamu Magmatic Sulfide Deposit[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 17–40.
- 尹福光, 王冬兵, 孙志明, 等. 哥伦比亚超大陆在扬子陆块西缘的探秘[J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(3): 31–40.
- YIN Fuguang, WANG Dongbing, SUN Zhiming, et al. Columbia supercontinent: New insights from the western margin of the Yangtze landmass[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, 32(3): 31–40.
- 曾威, 司马献章, 王家松, 等. 周庵铜镍-铂族矿床锆石 U-Pb 年代学, 地球化学及 Sr-Nd 同位素特征: 对周庵基性-超基性岩体及矿床成因的探讨[J]. 岩石学报, 2016, 32(4): 1232–1248.
- ZENG Wei, SIMA Xianzhang, WANG Jiasong, et al. Eochronology, geochemistry and Sr-Nd isotope characteristics of Zhouan Cu-Ni-PGE deposit: Genesis of mafic-ultramafic rock and ore deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(4): 1232–1248.
- Ao W H, Yan Z, Zhang Y K, et al. The Neoproterozoic magmatism in the northern margin of the Yangtze Block: Insights from Neoproterozoic (950–706 Ma) gabbroic-granitoid rocks of the Hannan Complex[J]. Precambrian Research, 2019, 333: 105–442.
- Barnes S J, Malitch K N, Yudovskaya M A. Introduction to a special issue on the Norilsk-Talnakh Ni-Cu-platinum group element deposits[J]. Economic Geology, 2020, 115(6): 1157–1172.
- Bouvier A, Vervoort J D, Patchett P J. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 273(1-2): 48–57.
- Dong Y, Liu X, Santosh M, et al. Neoproterozoic subduction tectonics of the northwestern Yangtze Block in South China: constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of mafic intrusions in the Hannan Massif[J]. Precambrian Research, 2011, 189(1-2): 66–90.
- Duan J, Qian Z, Feng Y, et al. Compositional variations of several Early Permian magmatic sulfide deposits in the Kalatongke district, southern Altai, western China: With genetic and exploration implications[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 90: 576–590.
- Cawood P A, Strachan R A, Pisarevsky S A, et al. Linking collisional and accretionary orogens during Rodinia assembly and break-up: Implications for models of supercontinent cycles[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 449: 118–126.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes, Tonggu and Pingtan igneous complexes[J]. Lithos, 2002, 61(3-4): 237–269.
- Hawkesworth C J, Gallagher K, Hergt J M, et al. Trace element fractionation processes in the generation of island arc basalts[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences, 1993, 342(1663): 179–191.
- Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 27–62.
- Li C, Naldrett A J. Melting reactions of gneissic inclusions with enclosing magma at Voisey's Bay, Labrador, Canada: Implications with respect to ore genesis[J]. Economic Geology, 2000, 95(4): 801–814.
- Li C, Zhang Z, Li W, et al. Geochronology, petrology and Hf-S isotope geochemistry of the newly-discovered Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in the Qinghai-Tibet plateau, western China[J]. Lithos, 2015, 216: 224–240.
- Li C, Ripley E M, Tao Y. Magmatic Ni-Cu and Pt-Pd Sulfide Deposits in China[M]. Society of Economic Geologists, 2019.
- Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis[J]. Precambrian Research, 2008, 160(1-2): 179–210.
- Ling W L, Gao S, Cheng J P, et al. Neoproterozoic magmatic events within the Yangtze continental interior and along its northern margin and their tectonic implication: constraint from the ELA-ICM-MS U-Pb geochronology of zircon from the Huangling and Hannan complexes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22: 387–396.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55: 1535–1546.
- Luo B J, Liu R, Zhang H F, et al. Neoproterozoic continental back-arc rift development in the Northwestern Yangtze Block: evidence from the Hannan intrusive magmatism[J]. Gondwana Res.

- 2018, 59: 27–42.
- Mao Y J, Zheng X, Pan T, et al. Redox-controlled olivine-sulfide equilibration of the Shitoukengde Ni–Cu deposit in Qinghai-Tibet Plateau and its implications[J]. *Mineralium Deposita*, 2024, 59(3): 577–599.
- Maier W D, Barnes S J, Sarkar A, et al. The Kabanga Ni sulfide deposit, Tanzania: I. Geology, petrography, silicate rock geochemistry, and sulfur and oxygen isotopes[J]. *Mineralium Deposita*, 2010, 45: 419–441.
- Maier W D, Groves D I. Temporal and spatial controls on the formation of magmatic PGE and Ni–Cu deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46: 841–857.
- Naldrett A J. Secular variation of magmatic sulfide deposits and their source magmas[J]. *Economic Geology*, 2010, 105(3): 669–688.
- Naldrett A J. Fundamentals of magmatic sulfide deposits[J]. 2011.
- Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[J]. *Orogenic andesites and related rocks*, 1982: 528–548.
- Pearce J A, Peate D W. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas[J]. *Annual Review of Earth And Planetary Sciences*, 1995, 23: 251–286.
- Pearce J A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. *Lithos*, 2008, 100(1-4): 14–48.
- Qiu X F, Ling W L, Liu X M, et al. Evolution of the Archean continental crust in the nucleus of the Yangtze block: Evidence from geochemistry of 3.0 Ga TTG gneisses in the Kongling high-grade metamorphic terrane, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 154: 149–161.
- Ripley E M, Li C. Sulfide saturation in mafic magmas: Is external sulfur required for magmatic Ni–Cu–(PGE) ore genesis?[J]. *Economic Geology*, 2013, 108(1): 45–58.
- Rollinson H R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation[M]. Routledge, 2014.
- Sokół K, Finch A A, Hutchison W, et al. Quantifying metasomatic high-field-strength and rare-earth element transport from alkaline magmas[J]. *Geology*, 2022, 50(3): 305–310.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[M]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
- Wang M X, Oliver Nebel, Yan W. “The flaw in the crustal ‘zircon archive’: mixed Hf isotope signatures record progressive contamination of late-stage liquid in mafic–ultramafic layered intrusions[J]. *Journal of Petrology*, 2016, 57(1): 27–52.
- Woodhead J, Hergt J, Shelley M, et al. Zircon Hf-isotope analysis with an excimer laser, depth profiling, ablation of complex geometries, and concomitant age estimation[J]. *Chemical Geology*, 2004, 209(1-2): 121–135.
- Wu Y B, Zheng Y F, Zhao Z F, et al. U–Pb, Hf and O isotope evidence for two episodes of fluid-assisted zircon growth in marble-hosted eclogites from the Dabie orogen[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(14): 3743–3761.
- Zhao J H, Zhou M F. Neoproterozoic adakitic plutons in the northern margin of the Yangtze Block, China: partial melting of a thickened lower crust and implications for secular crustal evolution[J]. *Lithos*, 2008, 104(1-4): 231–248.
- Zhao J H, Zhou M F. Melting of newly formed mafic crust for the formation of Neoproterozoic I-type granite in the Hannan region, South China[J]. *The Journal of Geology*, 2009a, 117(1): 54–70.
- Zhao J H, Zhou M F. Secular evolution of the Neoproterozoic lithospheric mantle underneath the northern margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Lithos*, 2009b, 107(3-4): 152–168.
- Zhao J H, Zhou M F, Yan D P, et al. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: no connection with Grenvillian orogeny[J]. *Geology*, 2011, 39: 299–302.
- Zhou L, Cao Y, Brzozowski M J, et al. Controls of Neoproterozoic magmatism on Ni–Cu sulfide mineralization in the Jiangnan Orogenic Belt, South China: An example from the newly discovered Sibao NiCu sulfide deposit[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2025, 107–694.
- Zhou Y, Zhong H, Li C, et al. Geochronological and geochemical constraints on sulfide mineralization in the Qingmingshan mafic intrusion in the western part of the Proterozoic Jiangnan orogenic belt along the southern margin of the Yangtze craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 90: 618–633.
- Zhu W G, Zhong H, Li X H, et al. 40Ar–39Ar age, geochemistry and Sr–Nd–Pb isotopes of the Neoproterozoic Lengshuiqing Cu–Ni sulfide-bearing mafic–ultramafic complex, SW China[J]. *Pre-cambrian Research*, 2007, 155(1-2): 98–124.