



引文格式: 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2025043  
**Citation:** 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2025043

## 新疆东天山黄山地区岩浆铜镍矿床 特征对比及找矿启示

张愿宁<sup>1,2</sup>, 徐刚<sup>3,\*</sup>, 王富贵<sup>1</sup>, 段俊<sup>3</sup>, 房明举<sup>3</sup>, 吴建涛<sup>3</sup>, 陆盈颖<sup>3</sup>

(1. 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省金矿资源勘查利用技术创新中心, 甘肃 兰州 730050;  
3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 新疆东天山黄山地区分布有黄山东、黄山西和黄山南等众多铜镍岩浆硫化物矿床, 是中国最重要的镍矿产地之一。笔者在前人研究成果基础上, 讨论了黄山地区不同含矿岩体成岩成矿过程的异同及地质意义。锆石年龄和岩石地球化学特征表明黄山东、黄山西和黄山南岩体源区性质相似; 橄榄石 Fo 值和母岩浆组分估算显示这些岩体均为高镁玄武岩经历深部结晶分异形成的镁铁-超镁铁质岩体。同位素及微量元素模拟结果表明这些岩体的原生岩浆普遍在深部混染了 5%~30% 的地壳物质, 并发生了深部硫化物熔离。相较于黄山东和黄山西矿床, 黄山南矿床 100% 硫化物中具有较高的 Ni、Cu、Pt、Pd 含量。模拟计算显示黄山南矿床的 R 值高于黄山东和黄山西矿床, 表明黄山南矿床中与硫化物液相发生反应的硅酸盐岩浆数量更多。橄榄石高 Fo 值以及硫化物低 Cu/Pd 值显示黄山南岩体橄榄石结晶和硫化物熔离的时间更早。结合不同岩体的剖面形态及埋深, 笔者认为黄山南岩体可能为深部岩浆房与浅部岩浆房的通道。相较于黄山南岩体, 黄山东和黄山西岩体可能为岩浆通道上部变宽部位。黄山南岩体底部及深部岩浆通道经历了多阶段持续的侵位-补给和硫化物聚集作用, 在深部通道系统变缓处、构造有利空间具有良好的成矿潜力。

**关键词:** 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄; 镁铁-超镁铁质岩石; 岩浆通道; 黄山铜镍成矿带; 东天山

中图分类号: P618.63

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)04-0102-16

### Comparison of Magmatic Cu-Ni Deposits in Huangshan Area, East Tianshan and Its Implications for Prospecting

ZHANG Yuanning<sup>1,2</sup>, XU Gang<sup>3,\*</sup>, WANG Fugui<sup>1</sup>, DUAN Jun<sup>3</sup>, FANG Mingju<sup>3</sup>, WU Jiantao<sup>3</sup>, LU Yingying<sup>3</sup>

(1. The Third Geological and Mineral Exploration Institute of Gansu Provincial, Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Gansu Gold Mineral Resources Exploration and Utilization Technology Innovation Center, Lanzhou 710050, Gansu, China; 3. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

收稿日期: 2024-12-30; 修回日期: 2025-03-25; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 陕西省自然科学基础研究计划(2023-JC-YB-224、2022JM-169), 长安大学创新创业训练计划项目(S202410710300),

甘肃省地质勘查基金(202201-D15、202302-D01)联合资助。

作者简介: 张愿宁(1986-), 男, 高级工程师, 从事区域地质调查和固体矿产地质勘查工作。E-mail: 853422683@qq.com。

\* 通讯作者: 徐刚(1984-), 男, 博士, 讲师, 主要从事镁铁质-超镁铁质岩石成因研究。E-mail: xugang@chd.edu.cn。

**Abstract:** The Huangshan area is the one of the most important ore field of nickel in the East Tianshan area and include the Huangshandong, Huangshanxi and Huangshannan magmatic sulfide Ni-Cu deposits. On the basis of the previous research achievements, we discuss the similarities and differences of the magmatic sulfide Ni-Cu deposits in Huangshan area in this paper. The zircon age and geochemistry characteristics show that Huangshandong, Huangshanxi and Huangshannan intrusions have the similar magmatic sources. The olivine Fo and estimated results indicate that the parental magma of these intrusions is supposed to be high Mg in composition and experienced the early olivine crystallization. The isotope and trace elements data show that the magma of these intrusion was formed by the mixing of a mafic magma derived from a depleted mantle with a granitic melt derived from a juvenile arc crust and occurred sulfide segregation in depth. Compared with the Huangshandong and Huangshanxi deposits, the 100% sulfide of the Huangshannan deposit have the higher contents of Ni, Cu, Pt and Pd. The simulated calculation show that the Huangshannan deposit have the higher R factor than Huangshandong and Huangshanxi deposits, which indicated there are more silicate magmas reacted with the sulfide liquid in the Huangshannan deposit. The high olivine Fo content and low sulfide Cu/Pd ratio in the Huangshannan intrusion indicate the time of olivine fractional crystallization and sulfide segregation is before the Huangshandong and Huangshanxi deposits. Combined with the profile shapes and cover depth of these intrusions, we suggest that the Huangshannan intrusion can be regarded as magma conduits between magma chamber while the Huangshandong and Huangshanxi intrusions may be the lower part of the magma chambers. The bottom of Huangshan intrusion and the underlying deep magma conduit have experienced multi-stage continuous emplacement, recharge, and sulfide accumulation. These processes indicate favorable ore-forming potential, particularly within the structural space created by the slowing down of the deep channel system.

**Keywords:** Zircon SHRIMP U-Pb age; Mafic-Ultramafic rocks; magma conduit; Huangshan Cu-Ni ore belt; East Tianshan

岩浆铜镍硫化物矿床作为中国镍、钴关键金属资源主要来源的矿床类型,对该类型矿床的找矿勘查及矿床研究受到大家高度的关注和日益重视。岩浆铜镍硫化物矿床通常赋存于不同大陆动力学背景下的科马提岩以及镁铁-超镁铁质岩体中(Ripley et al., 2018)。不同于全球,在中国汇聚板块背景下的铜镍成矿具有重要意义(Deng et al., 2022; Song et al., 2023)。研究者进一步将其分为两类:①形成于板块俯冲过程中,如青藏高原北部的~412 Ma 夏日哈木矿床(Li et al., 2015; Mao et al., 2024)。②形成于俯冲之后 20~30 Ma 的铜镍矿床,如位于天山和北山造山带中的二叠纪黄山东、黄山、白石泉和坡一矿床(Mao et al., 2015; Xue et al., 2018; Song et al., 2021; Song et al., 2023; Gao et al., 2024; 高晓峰等, 2025)。造山带中(汇聚边缘带环境和碰撞后伸展)的铜镍硫化物矿床为中国镍、铜、钴资源的重要类型,显示了中国造山带中岩浆铜镍硫化物矿床成矿的突出地位和巨大找矿前景。

新疆东天山铜镍成矿带是中国重要的铜镍矿集区(秦克章等, 2012; Xiao et al., 2019; 宋谢炎, 2019),其中,黄山地区的黄山东、黄山西、黄山南等大中型

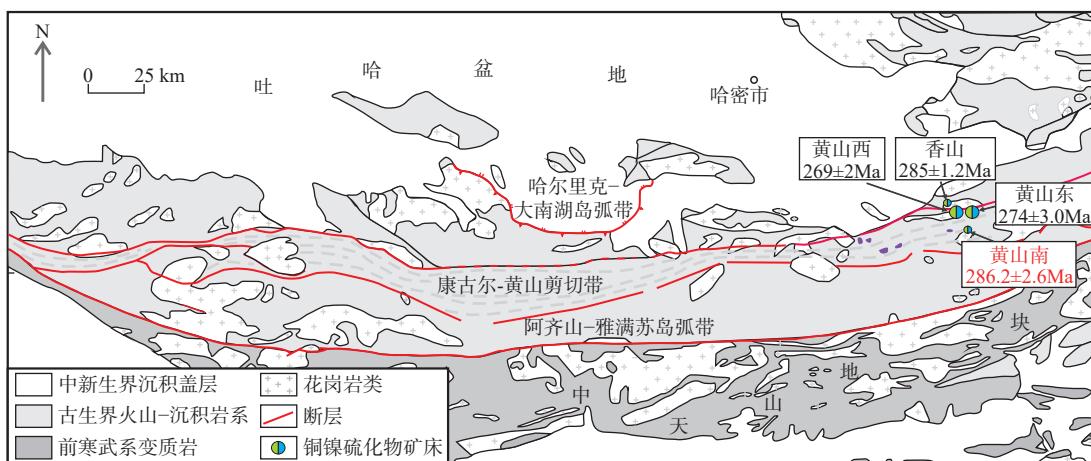
铜镍矿床镍储量占东天山成矿带总储量的 70%。因此,该地区的镁铁-超镁铁质岩体及岩浆硫化物矿床就成为研究东天山地区镁铁-超镁铁质岩浆演化和矿床成因的理想窗口。前人对这些岩体开展了岩相学、地质年代学、矿物岩石地球化学以及硫化物成分特征等一系列研究工作,普遍认为这些含矿岩体多为复式岩体,年龄介于 269~287 Ma,源区为俯冲交代地幔或软流圈地幔(冯延清等, 2017; Xue et al., 2018)含矿岩体形成于开放体系,结晶分异和(或)地壳混染是导致硫饱和的重要因素(Mao et al., 2016; Mao et al., 2017; 宋谢炎, 2019; Tang et al., 2021; Deng et al., 2022; Xue et al., 2022; Gao et al., 2024)。此外,不同含矿岩体之间也存在一些差异。例如,黄山南铜镍矿床具有高橄榄石 Fo 值、高亲铜元素品位等不同于其他矿床的特征(Zhao et al., 2016; Mao et al., 2017; Mao et al., 2019)。上述研究成果显示黄山地区不同含矿岩体在岩石成因、地球化学特征及硫饱和等方面既有相似性,又有差异性。因此,笔者在前人研究基础上,补充测试了黄山南岩体的年代学和地球化学数据,对比讨论黄山地区不同成矿岩体岩浆源区、

演化过程及硫化物富集机制的异同,以期为下一步区域找矿提供一定的参考。

## 1 区域地质背景、岩体及矿体地质特征

东天山古生代造山带位于吐哈地块和中天山地块之间,空间上由北向南可分为哈尔里克-大南湖岛

弧带、康古尔-黄山剪切带和阿齐山-雅满苏岛弧带3个不同的构造-地层(岩浆)-成矿带。康古尔-黄山剪切带夹于康古尔塔格-黄山深大断裂和苦水断裂之间,是一套强变形的无序的古生代地层系统(王京彬等,2006)(图1)。康古尔-黄山剪切带及其邻区发育了一系列走向近EW的镁铁-超镁铁质侵入岩体,这些岩体往往成群分布,普遍有铜镍矿化。



图中各矿床年龄数据来源: 黄山西源自 Zhang 等(2011); 黄山东源自 Sun 等(2013);  
香山源自肖庆华等(2010); 黄山南源自本研究

图1 东天山地区地质简图及铜镍硫化物矿床成矿时代分布(底图据王京彬等, 2006 修)

Fig. 1 Simplified geological map of Eastern Tianshan showing the ore-forming age of important magmatic Ni-Cu deposits

黄山地区的镁铁-超镁铁质岩体侵入石炭统干墩组中,岩体产状与区域构造走向一致,其中黄山东和黄山西岩体地处黄山-镜儿泉断裂带,主要受黄山断裂控制。黄山南位于二红洼-镜儿泉断裂南部,受该断裂的次级构造控制。以往对黄山东和黄山西岩体的规模、形态、岩相特征及含矿性论述较多(钱壮志等, 2012; Gao et al., 2013; 毛亚晶等, 2014; Deng et al., 2022),笔者在简要介绍黄山南岩体的基础上,对比上述岩体的异同。

黄山南岩体位于哈密市东南120 km处,区内出露地层主要为上石炭统(邓宇峰等, 2021)干墩组和少量新近系、第四系。岩体与地层为侵入接触关系,接触带围岩有明显的热接触变质作用,可见角岩化、云英岩化、千砾岩化。岩体地表呈大的透镜状,近EW向展布(图2a),长5.2 km,最宽处1.3 km,出露面积4 km<sup>2</sup>,岩体中间深两边浅,其中超镁铁质岩体纵向上剖面上呈“U”形,埋深约为600 m(图2b、图2c)(代玉财等, 2013)。相对而言,黄山东和黄山西岩体埋深更深,均超过1 000 m,且仍未穿过岩体(图3a、

图3b)。

黄山南岩体可分为弱矿化的基性岩相和含硫化物的超基性岩相,二者之间为明显的侵入接触关系。基性岩相主要为辉长岩(图4a)和苏长岩,呈中粒粒状结构。超基性岩相主要为橄榄辉长苏长岩(图4b)、橄榄二辉岩和角闪方辉橄榄岩(图4c、图4d),不同粒度的橄榄石、斜方辉石呈堆晶结构。从岩体蚀变程度看,黄山南岩体超镁铁质岩部分蚀变作用较强,如橄榄石蛇纹石化、伊丁石化,辉石纤闪石化等,铜镍矿氧化带中可见褐铁矿化。相对而言,黄山西和黄山东岩体蚀变较弱。

黄山南铜镍矿体主要赋存于橄榄岩相和辉橄榄岩相(图2b、图2c),深部橄榄岩相几乎全岩矿化。矿体形态为似层状,个别呈透镜状、脉状。矿石结构以浸染状为主,还有少量网脉结构和块状结构矿石。矿石矿物主要有磁黄铁矿、镍黄铁矿、紫硫镍铁矿、黄铜矿等。在矿石结构和组成上,黄山南和黄山东、黄山西矿床相似;不同的是,后两者的基性岩相也是赋矿岩相。

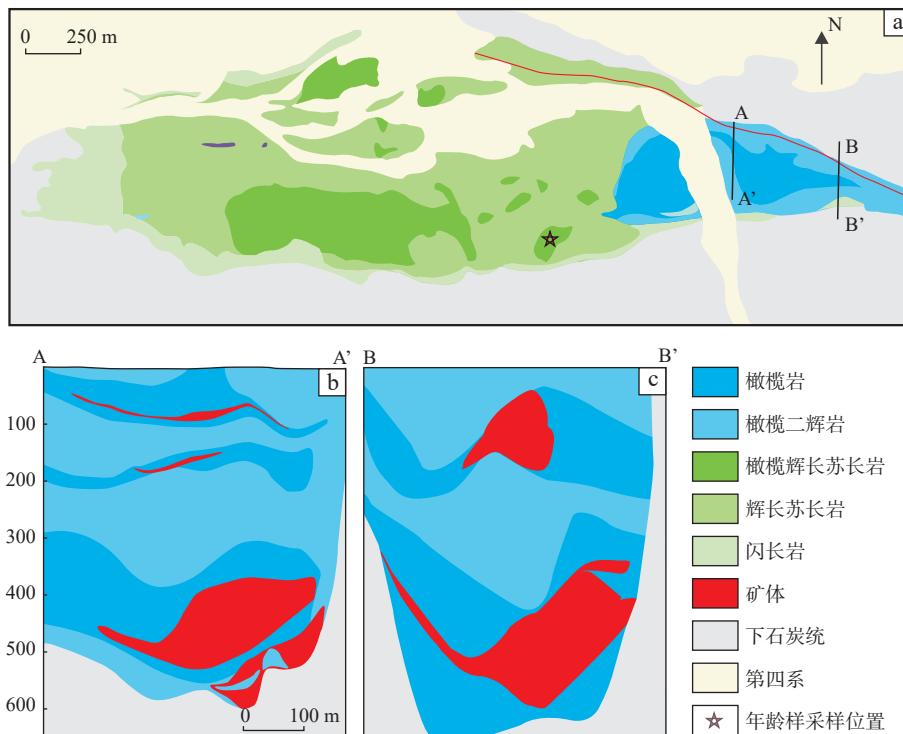


图2 黄山南含矿岩体地质图(a)和纵向投影图(b、c)(b、c据代玉财等, 2013修)

Fig. 2 (a) Plan view and (b, c) cross sections of the Huangshannan sulfide ore-bearing mafic-ultramafic intrusion

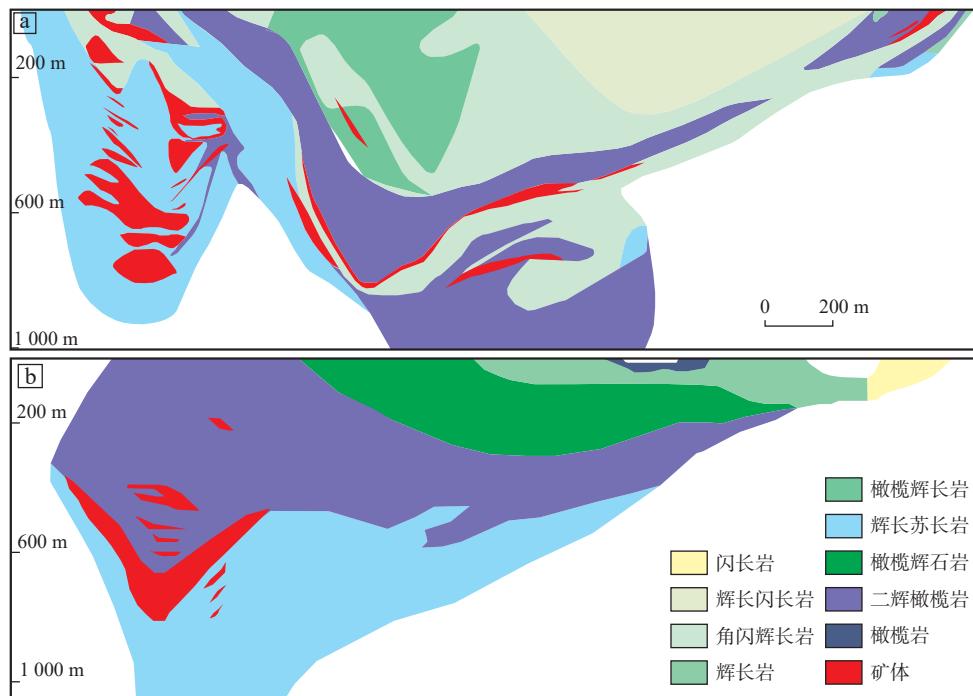


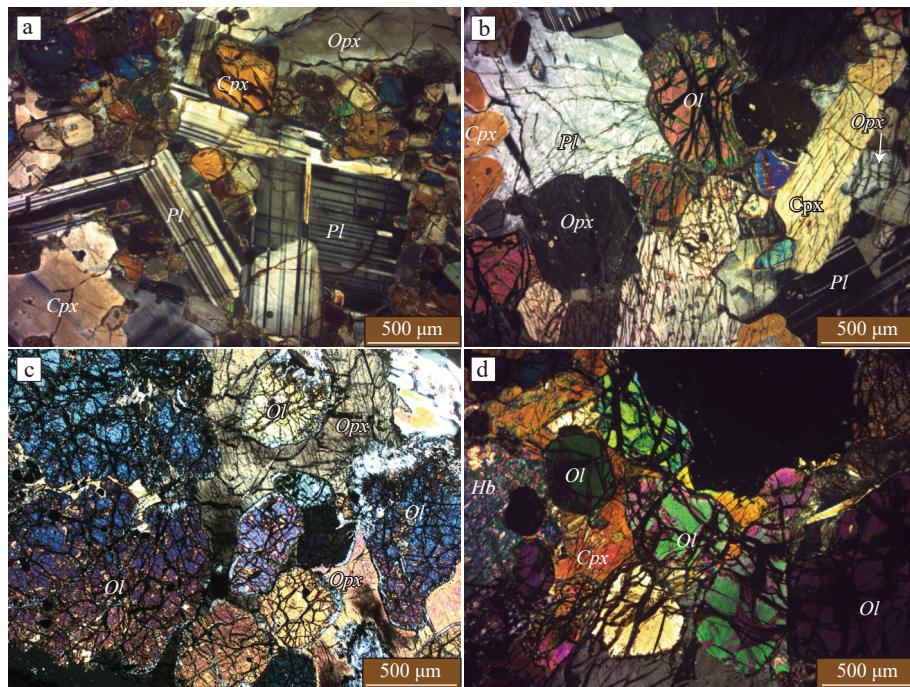
图3 黄山东含矿岩体剖面图(a)和黄山西含矿岩体剖面图(b)(据 Gao et al., 2013 修)

Fig. 3 (a) A long section along the axis of the Huangshandong intrusion and (b) Huangshanxi intrusion

## 2 样品选择和分析方法

笔者在大量收集前人研究资料的基础上,选取黄

山南岩体采集典型岩石样品 11 个,对一个样品(编号 HN, 辉长岩, ~50 kg)进行 SHRIMP 测年和锆石 Lu-Hf 同位素分析,其余样品(HN3-10)进行全岩主量、微量元素分析。



a.辉长岩；b.橄橄榄辉长苏长岩；c.橄橄榄二辉岩；d.角闪方辉橄榄岩；Ol.橄榄石；  
Opx.斜方辉石；Cpx.单斜辉石；Pl.斜长石；Hb.普通角闪石

图4 黄山南岩体主要岩石显微照片

Fig. 4 Major rock micrographs of the Huangshannan mafic-ultramafic intrusion

黄山南含矿岩体中主量元素采用 XRF-1800 型 X 射线荧光光谱仪测试,采用 XRF 熔片法,依据国家标准 GB/T14506.28-1993;微量元素分析采用美国 X-7 型 ICP-MS 完成,上述工作在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室进行。

锆石 SHRIMP 测年在北京离子探针中心完成。年龄样品采集黄山南镁铁-超镁铁质岩体第三侵入阶段橄榄辉长苏长岩,从较新鲜的辉长岩中挑选岩浆锆石,将待测样品锆石与 RSES 参考样 SL13 及数粒 TEM 置于环氧树脂制靶。锆石阴极发光及 SHRIMP U-Pb 测年详细流程和原理参考文献 Williams 等(1987)、Compston 等(1992)、Williams(1998)。

锆石 Lu-Hf 测定在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。锆石 Hf 同位素测试采用 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS),分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置,相关仪器运行条件及详细分析流程见文献(侯可军等,2007)。标准锆石 GJ-1 的  $^{178}\text{Hf} / ^{177}\text{Hf}$  测定结果为  $0.282\,014 \pm 15(2\sigma, n=13)$ ,该结果在误差范围内与文献报道值一致。

### 3 分析结果

#### 3.1 主量与微量元素

黄山南含矿岩体中全岩主量元素及主要造岩矿物分析数据见表 1 和表 2,全岩主量元素相关性以及与主要造岩矿物关系见图 5。橄榄岩和橄辉岩的相关性较好,样品全部投入橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和角闪石的成分区域,表明超基性岩受橄榄石和(或)辉石堆晶控制;苏长岩与辉长岩样品主要受单斜辉石、长石和角闪石矿物成分控制。这与黄山东和黄山西岩体特征一致。

在球粒陨石标准化的稀土元素图中,除苏长岩外,黄山南岩体橄榄岩、橄辉岩和辉长岩都具有相似的稀土元素配分模式,为轻稀土元素富集的右倾型。橄辉岩相对于橄榄岩更富集重稀土,可能受斜方辉石堆晶控制。部分样品具有弱的 Eu 异常,是由少量斜长石分离结晶造成的(图 6a)。原始地幔标准化的抗蚀变影响的微量元素蛛网图中,黄山南含矿岩体所有样品都强烈亏损 Nb、Ta(图 6b),苏长岩弱亏损 Zr、Hf。总体上看,黄山南岩体与黄山东、黄山西岩体具有类似

表1 黄山南岩体全岩主量、微量元素成分

Tab. 1 Major and trace element abundances in the Huangshannan intrusion

样品	NH3-1	NH3-2	NH3-4	NH3-5	NH3-6	NH3-7	NH3-8	NH3-9	NH3-10	NH3-12
SiO <sub>2</sub>	50.96	50.47	51.53	51.35	50.88	49.94	51.36	52.13	51.38	51.60
TiO <sub>2</sub>	0.60	0.64	0.44	0.34	0.48	0.38	0.47	0.34	0.42	0.46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.47	18.84	17.70	19.92	14.45	11.52	17.56	19.84	17.02	19.02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.24	7.16	6.25	6.39	5.41	9.32	6.73	5.09	6.44	6.32
MnO	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.15	0.12	0.10	0.12	0.11
MgO	9.65	9.46	10.06	9.35	10.19	17.65	10.17	8.06	10.84	8.44
CaO	11.36	10.50	11.36	9.80	16.94	9.47	10.55	11.05	11.34	10.46
Na <sub>2</sub> O	2.40	2.52	2.30	2.55	1.46	1.46	2.70	3.11	2.19	3.24
K <sub>2</sub> O	0.15	0.25	0.22	0.16	0.07	0.08	0.29	0.27	0.23	0.32
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.04	0.03	0.02	0.01	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02
Rb	4.87	7.60	6.46	4.21	1.91	1.85	7.71	8.63	7.91	9.76
Sr	393	421	381	465	309	307	385	473	424	519
Y	10.33	9.35	7.92	5.60	11.06	6.98	8.42	5.79	7.57	6.39
Zr	24.64	25.18	20.81	22.04	16.21	13.75	28.29	10.59	17.09	12.55
Hf	0.75	0.74	0.58	0.55	0.65	0.43	0.74	0.36	0.51	0.43
Nb	0.53	0.64	0.42	0.44	0.14	0.19	0.57	0.24	0.30	0.20
Ta	0.04	0.05	0.03	0.04	0.01	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02
Ba	32.65	31.85	34.00	34.41	19.04	13.44	34.19	42.29	1736.00	52.79
La	1.62	1.63	1.41	1.62	0.68	0.78	1.67	0.89	1.14	1.11
Ce	4.36	4.23	3.65	3.97	1.87	1.84	4.17	1.84	2.56	2.44
Pr	0.77	0.74	0.60	0.57	0.45	0.40	0.71	0.37	0.49	0.44
Nd	4.22	4.00	3.20	2.72	2.93	2.28	3.69	2.08	2.84	2.39
Sm	1.38	1.25	1.02	0.78	1.24	0.86	1.18	0.77	1.01	0.87
Eu	0.63	0.60	0.52	0.48	0.53	0.43	0.54	0.49	0.87	0.60
Gd	1.83	1.62	1.36	0.93	1.79	1.11	1.45	0.99	1.80	1.12
Tb	0.32	0.29	0.25	0.16	0.33	0.21	0.26	0.18	0.23	0.20
Dy	2.11	1.90	1.60	1.10	2.26	1.44	1.69	1.18	1.47	1.35
Ho	0.43	0.39	0.33	0.22	0.47	0.29	0.34	0.24	0.31	0.27
Er	1.27	1.15	0.99	0.69	1.34	0.85	1.04	0.70	0.93	0.80
Tm	0.17	0.16	0.15	0.10	0.18	0.12	0.14	0.10	0.13	0.11
Yb	1.02	0.93	0.79	0.60	1.15	0.83	0.95	0.61	0.87	0.71
Lu	0.16	0.15	0.13	0.10	0.16	0.12	0.14	0.09	0.12	0.10
Pb	1.14	2.67	1.45	2.21	1.19	0.89	1.35	2.62	2.90	1.16
Th	0.26	0.23	0.20	0.28	0.07	0.10	0.27	0.11	0.13	0.11
U	0.10	0.17	0.27	0.19	0.04	0.09	0.19	0.16	0.34	0.15

注: 主量元素含量为%; 微量元素含量为 $10^{-6}$ 。

的稀土和微量元素配分模式; 但不相容元素的丰度较低, 是堆晶矿物比例较高所致。

### 3.2 锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素

黄山南含矿岩体中橄榄辉长苏长岩样品中锆石

阴极发光图像(图 7a)显示, 锆石呈柱状, 半自形-自形晶结构, 晶面平直光滑, 韵律环带较发育, 锆石 Th/U 值>0.1(表 3), 为岩浆成因锆石(吴元保等, 2004)。锆石 U-Pb 谐和年龄为( $286.2 \pm 2.6$ ) Ma(图 7b), 表明黄山

表 2 黄山南岩体矿物成分  
Tab. 2 Mineral composition in the Huangshannan intrusion

<b>橄榄石</b>													
样号	岩性	测点数 (个)	FeO	SiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	CaO	NiO	Total	Fo	Ni	Ca	Mn
ZK179-3-1	橄榄辉长岩	6	17.20	39.76	42.62	0.27	0.01	0.11	99.98	81.54	857	64	2 106
ZK179-3-2	橄榄辉长岩	8	17.11	39.67	42.78	0.25	0.01	0.12	99.99	81.67	951	64	1 944
ZK179-3-3	橄榄辉长岩	10	16.70	39.98	43.41	0.25	0.01	0.09	100.53	82.25	715	64	1 959
ZK171-1-1	橄榄辉长岩	9	18.78	39.66	41.40	0.29	0.01	0.13	100.28	79.71	1 022	64	2 207
ZK171-1-2	橄榄辉长岩	5	18.93	39.66	41.62	0.30	0.01	0.13	100.69	79.67	1 053	64	2 354
ZK171-1-3	橄榄二辉岩	9	18.94	39.70	41.51	0.24	0.01	0.10	100.59	79.61	802	64	1 835
ZK171-1-4	橄榄二辉岩	11	18.53	40.16	41.49	0.23	0.03	0.10	100.58	79.96	770	186	1 812
<b>斜长石</b>													
样号	岩性	测点数 (个)	Na <sub>2</sub> O	FeO	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Total	An	Ab	Or	
HN13-2	辉长岩	11	4.71	0.16	54.33	0.46	11.34	27.97	99.11	55.55	41.75	2.70	
ZK171-1-2	橄榄辉长岩	6	4.76	0.13	53.66	0.05	11.79	28.28	98.78	57.58	42.10	0.32	
HN13-1	辉长岩	5	5.35	0.14	55.92	0.59	10.01	27.02	99.17	49.16	47.41	3.44	
ZK179-3-1	橄榄辉长岩	2	3.83	0.07	51.38	0.01	13.48	29.81	98.70	65.99	33.95	0.06	
HN13-3	辉长岩	7	5.31	0.18	55.67	0.50	10.40	27.34	99.61	50.47	46.65	2.88	
ZK171-1-3	橄榄辉长岩	2	3.99	0.19	52.11	0.10	13.29	29.67	99.48	64.46	34.98	0.56	
<b>斜方辉石</b>													
样号	岩性	测点数 (个)	Na <sub>2</sub> O	FeO	SiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Total	
HN13-2	辉长岩	6	0.04	16.24	54.03	0.15	25.84	0.30	1.25	1.78	0.25	99.97	2.5
ZK171-1-2	橄榄辉长岩	10	0.05	14.21	53.87	0.09	26.19	0.30	1.75	2.67	0.35	99.52	3.6
HN13-1	辉长岩	4	0.05	16.26	53.98	0.12	24.92	0.32	2.80	1.53	0.23	100.25	5.6
ZK179-3-1	橄榄辉长岩	6	0.05	9.94	54.58	0.16	29.37	0.24	1.86	3.66	0.23	100.14	3.7
HN13-4	辉长岩	8	0.03	17.90	53.48	0.28	24.13	0.36	1.86	1.70	0.30	100.10	3.8
ZK171-1-3	橄榄辉长岩	8	0.02	12.01	55.62	—	29.35	0.26	0.81	2.87	0.03	101.03	1.6
<b>单斜辉石</b>													
样号	岩性	测点数 (个)	Na <sub>2</sub> O	FeO	SiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Total	
HN13-2	辉长岩	7	0.51	7.38	52.23	0.32	14.83	0.18	20.84	2.47	0.73	99.49	44.1
HN13-4	辉长岩	5	0.53	8.66	52.03	0.22	14.34	0.18	20.36	2.37	0.58	99.37	43.2
ZK171-1-3	橄榄辉长岩	9	0.52	6.36	52.31	0.41	17.88	0.19	16.73	4.27	0.46	99.18	35.9

注: 主量元素含量为%; 微量元素含量为 $10^{-6}$ 。

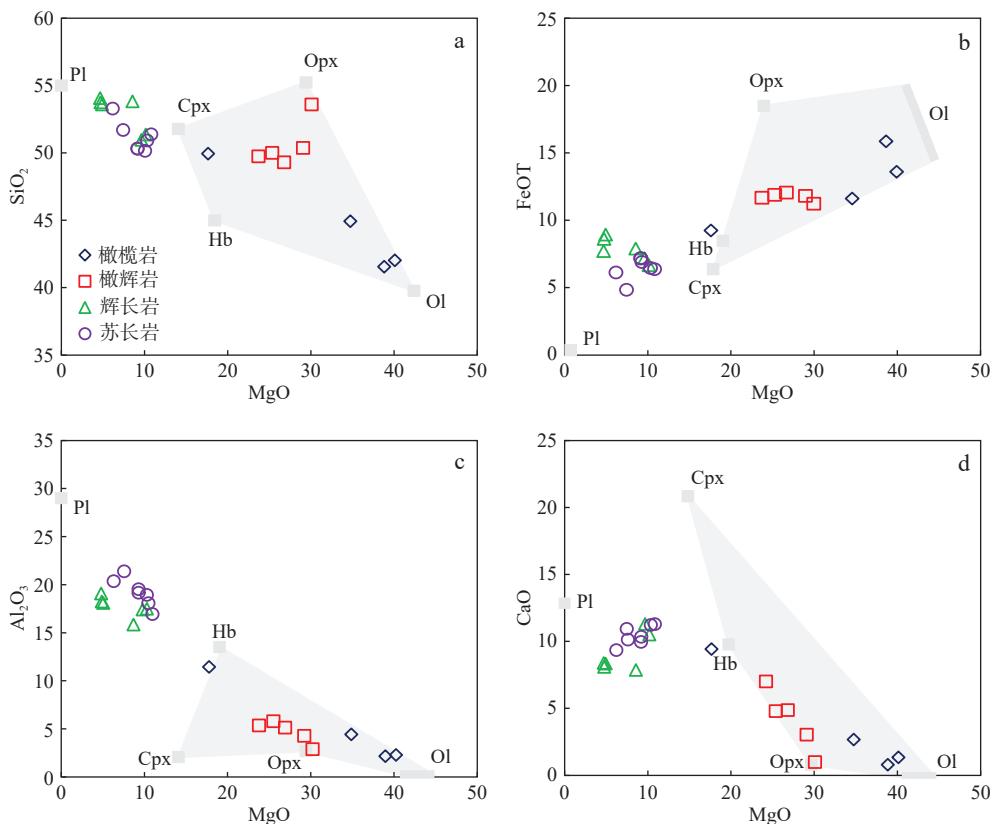
南含矿杂岩体形成于早二叠世,与附近的黄山东、黄山西以及香山岩体的侵入时代一致(肖庆华等,2010),为东天山地区二叠纪镁铁-超镁铁质岩体的侵入峰值期。

黄山南15个分析点的锆石Hf同位素分析数据较为均一(表4),( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>i</sub>值为0.282 903~0.282 987,平均值为0.282 947,  $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为+10.91~+13.89,与黄

山(+14.17~+16.57)和黄山西岩体(+8.74~+13.53)近似(Su et al., 2011; Sun et al., 2013)(图8),表明这些岩体均来源于亏损的地幔源区。

### 3.3 Sr-Nd同位素

黄山南岩体全岩Sr-Nd同位素测试数据(表5)表明:黄山南岩体岩浆源区具有亏损地幔特征, $\varepsilon\text{Nd}(t=286\text{ Ma})$ 值为+6.98~+9.20,高于黄山超镁铁质



部分数据引自 Mao 等(2013)，其余数据为本研究数据；Ol. 橄榄石；Opx. 斜方辉石；Cpx. 单斜辉石；Hb. 角闪石

图5 黄山南岩体全岩主量元素与MgO关系图

Fig. 5 Plots of oxides versus mgo contents in whole-rock compositions of the Huangshannan mafic-ultramafic intrusion

岩体  $\varepsilon_{\text{Nd}}$  值。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值为  $0.703\,547 \sim 0.704\,000$ ，平均为  $0.704\,288\,0$ ，变化范围较窄，高于洋中脊玄武岩(MORB)( $0.702\,29 \sim 0.703\,16$ ) (Saunders et al., 1988)。在  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  相关图中样品都落于第二象限，位于 OIB 和 MORB 附近，说明岩浆源区具有亏损地幔的性质，同位素模拟计算表明，黄山南岩体岩浆形成于幔源岩浆演化的玄武质岩浆，在上升侵位过程中同化混染~5% 的上地壳物质(图 9a)。

#### 3.4 铂族元素

黄山地区铜镍硫化物矿床的铂族元素数据积累较多，笔者结合已发表的数据分析不同岩体亲铜元素之间的变化。样品中剔除了含>15% 硫(即半块状和块状矿石)和<1% 硫的样品，确保样品代表黄山地区铜镍硫化物矿床中典型的浸染状和网状硫化物矿石。使用(Barnes et al., 2013)中的方程进行100% 硫化物计算。黄山东、黄山西和黄山南矿床中硫化物矿石具有一致的配分模式(图 10)，显示出PGE相对Ni, Cu 亏损且IPGE相对PPGE亏损的左倾模式。相比之下，黄山南矿床具有较高的PGE含量。

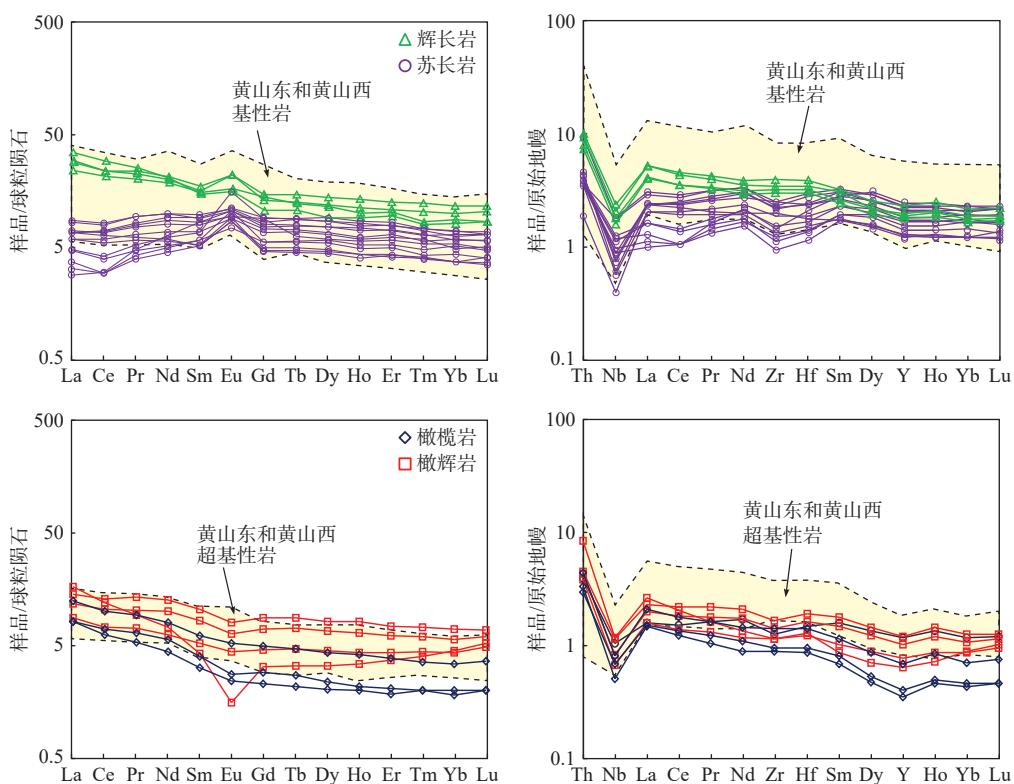
不同岩体的矿石均具有较高的Cu/Pd值，其中，黄山东为  $140 \times 10^3 \sim 6904 \times 10^3$ ，黄山西为  $188 \times 10^3 \sim 2178 \times 10^3$ ，黄山南为  $47 \times 10^3 \sim 865 \times 10^3$ 。相比之下，黄山南相对其他矿床具有较低的Cu/Pd值。

## 4 讨论

### 4.1 母岩浆组分对比

黄山南岩体橄榄岩样品中橄榄石最高  $Fo = 86.84\text{ mol\%}$ ，大于黄山东和黄山西岩体，但三者均低于地幔橄榄石  $Fo$  值( $\sim 90\text{ mol\%}$ )。这表明这些岩体母岩浆都不是地幔熔融形成的原生岩浆，而是经过深部橄榄石结晶分异的派生岩浆。

母岩浆成分估算可以由岩体冷凝边、质量平衡计算、矿物成分反算以及同期玄武岩成分等方法限定(Chai et al., 1992; Lightfoot et al., 2005; Li et al., 2011)。黄山地区含矿镁铁-超镁铁质岩体普遍不发育冷凝边；岩体均遭受一定程度的剥蚀，质量平衡方法也无法使用。同时，区域内二叠纪玄武岩研究程度低，岩体的



球粒陨石值源自 Anders 等(1989); 原始地幔值源自 Sun 等(1989); 黄山西与黄山东岩体区域源自 吴元保等(2004)、Sun 等(2013)、Mao 等(2015)

图6 黄山地区含矿镁铁-超镁铁质岩体球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线图和原始地幔标准化的多元素蛛网图  
Fig. 6 Chondrite-normalized REE and mantle-normalized immobile trace element patterns of whole-rock samples from the sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions in the Huangshan area

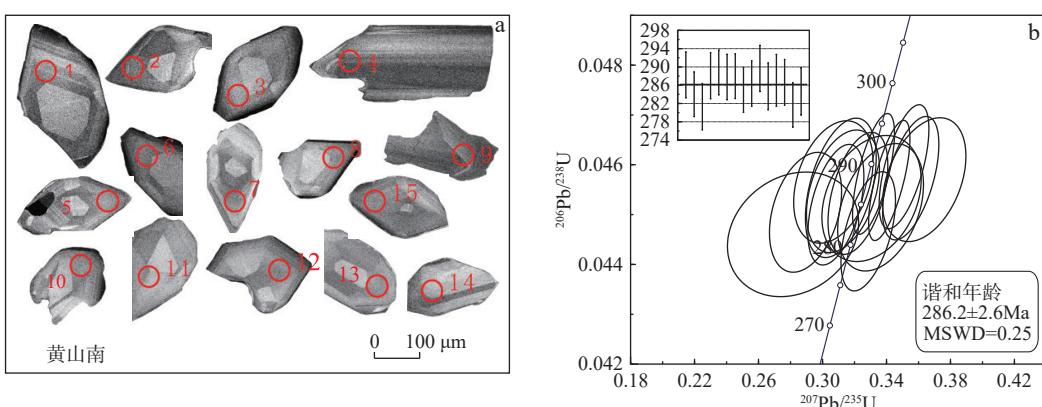


图7 黄山南含矿岩体锆石 CL 图像及各测试点位置(a)及锆石 U-Pb 谱和年龄示意图(b)  
Fig. 7 (a) CL images and the location of analyze point for zircons and (b) sketch of u-pb concordia age from the Huangshannan sulfide ore-bearing intrusion

母岩浆组分也难以限定。在岩浆在结晶分异过程中, 橄榄石和晶间液相之间 Fe-Mg 分配系数为一固定值, 该值基本不受温度、压力、熔体成分等因素的影响 (Roeder, 1970), 选取黄山南超美铁质岩体中 Fo 值最高的橄榄石就可以估算得到橄榄石刚结晶时的母岩

浆的成分。因此, 笔者采用橄榄石和熔体的平衡 (Li et al., 2009) 来反算母岩浆的成分。可以估算晶间液相熔体中 MgO 和 FeO 的比值, 选择黄山南岩体中橄榄石 Fo (Fo=86.84 mol%) 最高的样品进行计算, 得到母岩浆的 MgO=10.03 %, 属高镁玄武质岩浆, 其主量元素成

表3 黄山南含矿岩体锆石 SHRIMP U-Pb 测试结果

Tab. 3 SHRIMP U-Pb data of zircons from the Huangshannan sulfide ore-bearing intrusion

测试点	$^{206}\text{Pb}^*$	Th	U	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$		Ratio	$\pm\%$	Ratio	$\pm\%$	Age(Ma)	$\pm\%$
HN-1	7.8	43.6	199.0	0.23	0.355 00	3.3	0.045 73	1.8	288.3	$\pm 5.0$
HN-2	13.1	71.4	336.8	0.22	0.289 00	5.1	0.045 05	1.8	284.0	$\pm 4.9$
HN-3	8.6	47.3	221.6	0.22	0.282 00	9.6	0.044 60	1.8	281.3	$\pm 5.1$
HN-4	8.5	140.6	217.0	0.67	0.364 00	4.7	0.045 70	1.8	288.1	$\pm 5.1$
HN-5	12.4	66.7	314.8	0.22	0.331 90	2.6	0.045 82	1.7	288.8	$\pm 4.9$
HN-6	10.8	58.0	273.8	0.22	0.307 00	5.3	0.045 65	1.8	287.8	$\pm 5.0$
HN-7	16.0	103.7	409.4	0.26	0.341 70	2.5	0.045 68	1.7	288.0	$\pm 4.9$
HN-8	12.7	75.0	324.3	0.24	0.308 00	3.7	0.045 20	1.8	285.0	$\pm 4.9$
HN-9	13.3	87.9	340.8	0.27	0.322 00	3.8	0.045 43	1.8	286.4	$\pm 5.0$
HN-10	9.5	51.7	241.6	0.22	0.351 00	2.9	0.045 96	1.8	289.7	$\pm 5.1$
HN-11	7.7	48.1	195.9	0.25	0.331 00	6.2	0.045 32	1.8	285.7	$\pm 5.1$
HN-12	10.6	55.9	270.3	0.21	0.311 00	4.7	0.045 54	2	287.1	$\pm 5.7$
HN-13	11.6	71.3	295.3	0.25	0.313 00	4.8	0.045 47	1.8	286.6	$\pm 5.0$
HN-14	13.0	69.9	337.2	0.21	0.329 00	3.4	0.044 66	1.8	281.7	$\pm 4.9$
HN-15	15.0	83.5	388.0	0.22	0.336 00	5.3	0.045 15	1.9	284.7	$\pm 5.2$

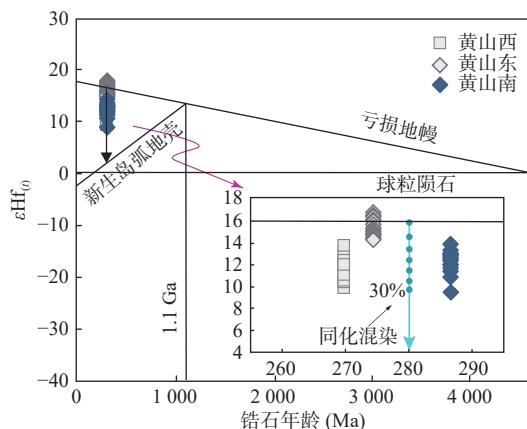
表4 黄山南岩体辉长岩中锆石 LA-ICP-MS Lu-Hf 同位素结果

Tab. 4 Zircons Lu-Hf isotope compositions of olivine gabbro in Huangshannan mafic-ultramafic intrusion

编号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1	0.092 745	0.001 677	0.282 939	0.000 017	0.282 930	11.9	452	-0.95
2	0.106 623	0.002 024	0.282 978	0.000 019	0.282 967	13.2	399	-0.94
3	0.089 222	0.001 700	0.282 959	0.000 018	0.282 950	12.6	423	-0.95
4	0.102 301	0.001 654	0.282 911	0.000 017	0.282 903	10.9	492	-0.95
5	0.095 908	0.001 864	0.282 936	0.000 018	0.282 926	11.7	459	-0.94
6	0.081 085	0.001 670	0.282 941	0.000 015	0.282 932	11.9	449	-0.95
7	0.129 953	0.002 579	0.282 973	0.000 016	0.282 959	12.9	414	-0.92
8	0.102 679	0.002 289	0.282 975	0.000 015	0.282 962	13.0	407	-0.93
9	0.101 556	0.002 107	0.282 998	0.000 016	0.282 987	13.9	371	-0.94
10	0.062 083	0.001 373	0.282 981	0.000 014	0.282 973	13.4	389	-0.96
11	0.078 933	0.001 772	0.282 971	0.000 016	0.282 961	13.0	407	-0.95
12	0.094 601	0.001 997	0.282 955	0.000 016	0.282 944	12.4	433	-0.94
13	0.090 873	0.002 074	0.282 947	0.000 018	0.282 936	12.1	445	-0.94
14	0.098 492	0.002 384	0.282 962	0.000 027	0.282 950	12.6	426	-0.93
15	0.104 552	0.002 001	0.282 939	0.000 018	0.282 928	11.8	457	-0.94

分见表6。采用同样方法计算的黄山东和黄山西岩体的母岩浆组分列于表6。由表6可知,黄山地区不同

含矿岩体的母岩浆均为经历了深部结晶分异的高镁玄武质岩浆,具有相似的组分含量。



计算参数：亏损地幔 Hf 的丰度值 (Sun et al., 1989) 为 2.05, 新生岛弧地壳 Hf 的丰度等于平均地壳值 (Rudnick and Gao, 2003) 为 3.7, 黄山西和黄山东 Hf 同位素数据: Sun et al., 2013;

Su et al., 2011

图8 黄山地区含矿镁铁-超镁铁质岩体锆石 T- $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$  图解  
Fig. 8 Zircon Hf isotopic features for the sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions in the Huangshan area

## 4.2 地壳混染与硫饱和

通常来说, 帷源岩浆在上升过程中会经历一定程度的地壳混染, 导致  $\epsilon\text{Nd}(t)$  和  $\epsilon\text{Hf}(t)$  值降低。黄山东、黄山西和黄山南岩体在 Sr-Nd 同位素图解中都落在地幔与上地壳的混合模拟演化线上(图 9a), 并且混染程度大多小于 5%。如此小程度的地壳混染不能解释大多数岩体较高的  $(\text{Th}/\text{Nb})_{\text{PM}}$  值(高于 N-MORB 的 4.3 (Sun et al., 1989))。Sun 等(2013)研究认为黄山东镁

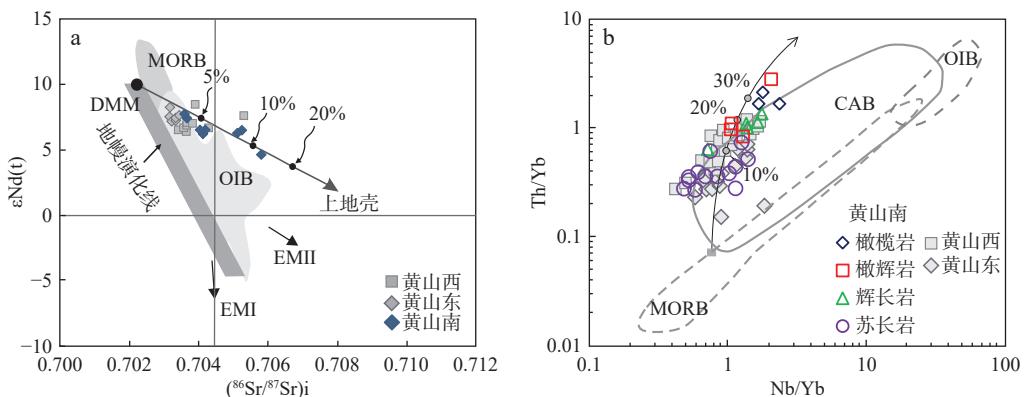
铁-超镁铁质岩体的岩浆在上侵过程中混染了 5%~30% 的由新生的岛弧地壳部分熔融形成花岗质岩浆, 导致岩浆具有较高的  $\epsilon\text{Nd}(t)$  值和  $(\text{Th}/\text{Nb})_{\text{PM}}$  值。笔者选择东天山地区 A 型花岗岩(284 Ma)作为东天山地区年轻弧地壳组分的代表与亏损地幔进行模拟计算, 如图 8 所示, 结果表明黄山西和黄山南岩体也经历了 5%~30% 的地壳混染作用。该结果与选择具有相似配分系数的微量元素比值模拟结果一致(图 9b)。由此看来, 这一岩浆演化过程同样适用于黄山西和黄山南岩体。深部古生代地壳物质的混染会造成岩浆中  $\text{SiO}_2$  含量升高,  $\text{FeO}$  含量降低, 从而使岩浆中硫的溶解度降低达到硫饱和, 发生硫化物熔离。黄山地区不同含矿岩体较高的  $\text{Cu}/\text{Pd}$  值也反映出岩浆深部发生过硫化物熔离作用。

经历过深部硫化物熔离的岩浆在上升过程中由于压力的降低会变得硫不饱和(Mavrogenes et al., 1999; O'neill et al., 2022)。这种岩浆从地幔源区上升到地壳后, 必须再次达到硫饱和才能熔离出硫化物。在这个过程中, 地壳混染、结晶分异以及地壳硫的加入等都可能是影响硫饱和的主要因素。前人通过模拟玄武质岩浆的结晶过程和岩浆最高硫溶解度(SCSS), 认为经过橄榄石的结晶分异, 黄山东岩体达到了硫饱和, 而黄山西和黄山南岩体未能达到(Mao et al., 2015, 2016; 2018), 表明结晶分异并不是黄山地区含矿镁铁-超镁铁质岩体硫饱和的主要因素。前人研究表明东

表 5 黄山南岩体全岩 Sr-Nd 同位素组分

Tab. 5 Sr-Nd isotope composition of whole rock in Huangshannan mafic-ultramafic intrusion

样号	岩性	$\text{Rb}(10^{-6})$	$\text{Sr}(10^{-6})$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$
HN3-2	角闪橄榄辉石岩	7.60	421.20	0.052 247	0.703 829	0.703 621
HN3-5	角闪辉橄岩	4.21	465.10	0.026 223	0.703 651	0.703 547
HN3-6	辉橄岩	1.91	309.70	0.017 849	0.706 977	0.706 906
HN3-8	角闪辉长岩	7.71	385.30	0.057 934	0.703 946	0.703 715
HN3-10	辉长苏长岩	7.91	424.70	0.053 923	0.704 215	0.704 000
HN3-12	橄长岩	9.76	519.80	0.054 363	0.704 156	0.703 940
样号	岩性	$\text{Sm}(10^{-6})$	$\text{Nd}(10^{-6})$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
HN3-2	角闪橄榄辉石岩	1.25	4.00	0.190 387	0.513 083	8.92
HN3-5	角闪辉橄岩	0.78	2.72	0.173 735	0.513 014	8.16
HN3-6	辉橄岩	1.24	2.93	0.257 393	0.513 220	9.20
HN3-8	角闪辉长岩	1.18	3.69	0.193 700	0.513 021	7.59
HN3-10	辉长苏长岩	1.01	2.84	0.216 969	0.513 092	8.14
HN3-12	橄长岩	0.87	2.39	0.221 668	0.513 041	6.98



数据来源: MORB、CAB 和 OIB 范围据 Li 等(2009); 黄山东和黄山西岩体数据源自 Su 等(2011)、Mao 等(2014)、Deng 等(2022)

图9 黄山地区含矿镁铁—超镁铁质岩体( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>- $\varepsilon\text{Nd}_{(t)}$ 相关图解(a)Nb/Yb-Th/Yb 相关图解(b)

Fig. 9 (a) Correlation diagram of  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  and  $\varepsilon\text{Nd}_{(t)}$  and (b) Nb/Yb VS Th/Yb for sulfide -bearing mafic-ultramafic intrusions in the Huangshan area

表6 黄山东、黄山西和黄山南岩体母岩浆成分(%)

Tab. 6 Compositions of estimated parental magmas(%) for the Huangshannan intrusion

组分	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	Total	来源
黄山南	47.87	0.71	13.3	1.87	10.46	0.28	10.03	12.59	1.71	0.71	0.17	100	本研究
黄山东	53.59	0.86	13.79	1.01	9.38	0.15	10.03	8.26	1.88	0.90	0.15	100	Mao et al., 2014
黄山西	51.20	1.00	15.70	0.90	8.36	0.27	8.711	11.21	1.91	0.50	0.20	100	Mao et al., 2014

天山黄山地区含矿岩体的  $\gamma\text{Os}(t)$  值范围大且高(Tang et al., 2021),  $\delta^{34}\text{S}$  值与围岩干墩组中黄铁矿的范围接近(孙赫, 2009), 这些特征都显示出岩浆在侵位过程中有地壳硫加入。最新测试结果显示黄山东、黄山西和黄山南岩体矿石样品 Se/S 值位于地幔范围和地壳范围之间(Zhao et al., 2015; 赵云等, 2016; 尤敏鑫等, 2018; Deng et al., 2022), 也体现出壳源硫的加入。综上所述, 黄山地区含矿岩体的岩浆在上升过程中普遍吸收了地壳围岩中的硫化物, 这可能是导致第二次硫化物熔离的关键因素。

#### 4.3 成矿过程对比及找矿启示

黄山南矿床浸染状硫化物矿石中的 PGE 含量高于黄山东和黄山西(图 10)。Naldrett(2011)总结了控制硫化物中金属品位的因素: ①岩浆中金属元素的初始含量。②硫化物熔离时的 R-factor(硅酸盐岩浆和硫化物熔体的质量比)。③硫化物液相分离结晶作用。浸染状硫化物矿石中亲铜元素组分一般不受第 3 个因素影响, 因此笔者只讨论前两个因素。由于 Cu 在硫化物/岩浆中的分配系数远远小于 PGE, 故首先使用 Cu 含量限定 R-factor 的最小值。黄山南岩体含矿样品的 100% 硫化物中 Cu 含量最低为~1.5%, 镁铁质

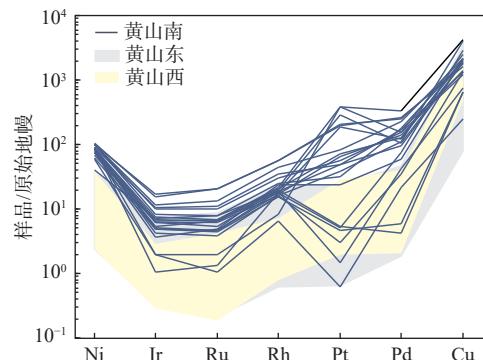


图10 黄山地区含矿镁铁-超镁铁质含矿岩体铂族原始地幔标准化图

Fig. 10 Primitive mantle-normalized pge patterns for sulfide bearing rocks from the sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions in the Huangshan area

岩浆中 Cu 的初始含量和在硫化物/岩浆中的分配系数分别为  $120 \times 10^{-6}$  和 1 500(Ripley et al., 2002; Barnes et al., 2013; Mungall et al., 2014), 计算得到黄山南矿床 R-factor 的最小值为~150, 由此可得 PGE 的初始含量。根据上述结果对黄山南矿床 R-factor 进行模拟, 得到的 R 值为 150~2 000(图 11a), 高于黄山东和黄山西(吴元保等, 2004; Sun et al., 2013; Mao et al., 2015)

(图 11a), 表明黄山南矿床在形成过程中与硫化物液相发生反应的硅酸盐岩浆数量更多。此外, 由于 Cu 和 Pd 在硫化物和硅酸盐熔体之间分配系数的差异 (Cu: 200; Pd: 10 000~40 000) (Naldrett, 2011), 早期熔离

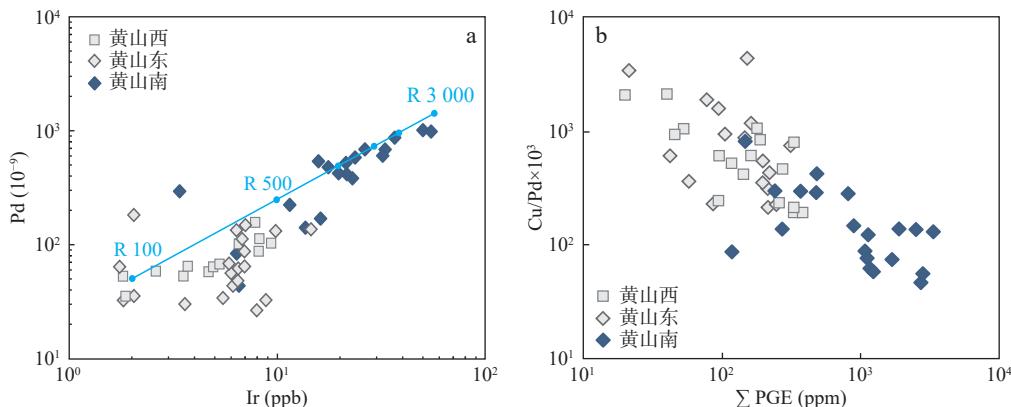
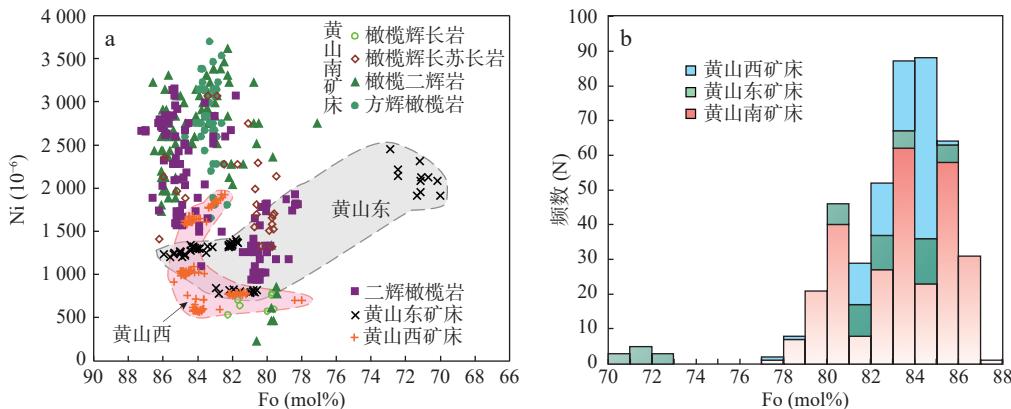


图11 黄山地区含矿镁铁-超镁铁质岩体的 R-factor 模拟(a)ΣPGE 和 Cu/Pd 值相关图(b)

Fig. 11 (a) R-factor modeling and (b) correlation diagram of  $\sum\text{PGE}$  and Cu/Pd of the sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions in the Huangshan area

黄山南矿床含矿超镁铁质岩相中橄榄石相较黄山东、黄山西具有更高的 Fo 值(图 12b)和更大变化范围 Ni 含量(图 12a), 这显示了黄山南矿床是由深部含硫化物的镁铁质岩浆沿着黄山南岩浆通道系统多阶段持续的侵位-补给-聚集动态平衡的结果; 而黄山东、黄山西矿床中硫化物 R 因子和橄榄石 Fo 值的局限性表明黄山东、黄山西矿床形成于次级岩浆通道中单阶段的含矿岩浆的侵位-聚集作用, 缺少持续的岩浆补给过程。

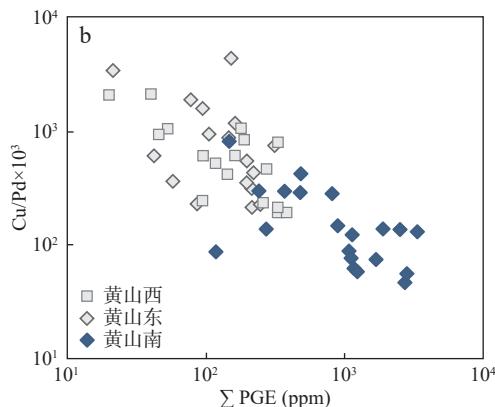


数据来源: 本文补充测试黄山南橄榄辉长岩的数据及部分橄榄二辉岩数据; 黄山南部分橄榄二辉岩数据引自夏明哲(2009); 黄山东、黄山西矿床及黄山南二辉橄榄岩、橄榄辉长苏长岩数据引自 Mao 等(2022); 黄山南橄榄二辉岩、橄榄辉长苏长岩数据引自王旋等(2021), 黄山东和黄山西部分数据引自邓宇峰(2021)

图12 黄山地区含矿超镁铁质岩石橄榄石 Fo-Ni 相关图(a)和橄榄石 Fo 分布直方图(b)

Fig. 12 (a) Fo-Ni correlation diagram and (b) Fo distribution histogram of the sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions in Huangshan area

的硫化物的 Cu/Pd 值比晚期低。黄山南岩体的 Cu/Pd 值低于黄山东和黄山西(图 11b), 表明前者岩浆中硫化物熔离时间更早。综上所述, 较高的 R 因子以及较低的 Cu/Pd 值指示黄山南岩体可能为深部岩浆通道相。



从剖面图上看, 黄山东和黄山西岩体分别呈深盆状和漏斗状(图 3a、图 3b), 控制深度均超过 1 200 m。黄山南岩体东段超基性岩埋深在 600 m 左右, 小于黄山东和黄山西。笔者推测黄山南岩体可能为深部岩浆房与浅部岩浆房的通道, 早期结晶的高 Fo 橄榄石和低 Cu/Pd 值的硫化物在通道内富集成矿。相较于黄山南岩体, 黄山东和黄山西岩体为通道上部变宽部位, 硅酸盐矿物和硫化物珠滴在上部变宽处聚集成矿, 早期熔离的硫化物和高 Fo 橄榄石可能残留在下部通道

中。因此,黄山南岩体底部及深部岩浆通道经历了多阶段持续的侵位-补给和硫化物聚集作用,在深部通道系统变缓处、构造有利空间具有良好的成矿潜力。这一模型不仅深化了新疆东天山地区镁铁-超镁铁岩型铜镍矿床的成因认知,也为隐伏矿体预测(如主通道深部延伸区)和勘查技术优化(如高精度重力-电磁联合探测)提供了科学依据。

## 5 结论

(1) 黄山南岩体成矿时代、岩石地球化学特征表明其与黄山西和黄山东岩体具有相似的源区性质;母岩浆组分计算显示这些岩体均为高镁玄武岩经历深部结晶分异形成的镁铁-超镁铁质岩体。

(2) 黄山东、黄山西和黄山南岩体的原生岩浆在深部与新生的岛弧地壳发生了5%~30%混染,导致岩浆硫饱和并发生深部硫化物熔离。

(3) 岩体延伸深度、硫化物PGE特征以及R因子计算表明黄山南岩体可能为深部岩浆房与浅部岩浆房的通道。相较于黄山东和黄山西矿床为次级岩浆通道含矿岩浆的侵位聚集作用,黄山南岩体底部及深部岩浆通道仍具有成矿潜力。

**致谢:** 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、宋燕和杜金花老师大力支持和帮助。审稿专家悉心审稿并提出了许多宝贵的意见和建议,在此一并致谢!

## 参考文献(References):

- 代玉财,马雷,郗文亮,等.新疆哈密市黄山南铜镍矿床地质特征及成因浅谈[J].新疆有色金属,2013,(4):39~44.
- DAI Yucai, MA Lei, XI Wenliang, et al. On the Geological Characteristics and Ore Genesis of Huangshannan Ni Deposit, Hami, Xinjiang[J]. Non-ferrous Metal of Xinjiang, 2013, (4): 39~44.
- 邓宇峰,宋谢炎,颉炜,等.黄山-镜儿泉铜镍成矿带地层时代的厘定及其地质意义探讨[J].地质学报,2021,95(2):362~376.
- DENG Yufeng, SONG Xieyan, JIE Wei, et al. Determination of sedimentary ages of strata in the Huangshan- Jing'erquan mineralization belt and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(2): 362~376.
- 冯延清,钱壮志,徐刚,等.东天山二叠纪镁铁-超镁铁质成矿岩体造岩矿物特征及其成因意义[J].岩石矿物学杂志,2017,36(4):519~534.
- FENG Yanqing, QIAN Zhuangzhi, XU Gang, et al. Features of Rock-Forming Minerals of Permian Mineralized Mafic-Ultramafic Intrusions in East Tianshan and Their Implication for Intrusion Generation[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2017, 36(4): 519~534.
- 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.
- 侯可军,李延河,邹天人,等.LA-MC-ICP-MS锆石Hf同位素的分析方法及地质应用[J].岩石学报,2007,23(10):2595~2604.
- HOU Kejun, LI Yanhe, ZOU Tianren, et al. Laser Ablation-MC-ICP-MS Technique for Hf Isotope Microanalysis of Zircon and Its Geological Applications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2595~2604.
- 毛亚晶,秦克章,唐冬梅,等.东天山岩浆铜镍硫化物矿床的多期次岩浆侵位与成矿作用—以黄山铜镍矿床为例[J].岩石学报,2014,30(6):1575~1594.
- MAO Yajing, QIN Kezhang, TANG Dongmei, et al. Multiple Stages of Magma Emplacement and Mineralization of Eastern Tianshan, Xinjiang: Examplified by the Huangshan Ni-Cu Deposit [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(6): 1575~1594.
- 钱壮志,张江江,孙涛,等.新疆黄山东岩体Hf-Nd同位素特征及其地质意义[J].西北地质,2012,45(4):145~154.
- QIAN Zhuangzhi, ZHANG Jiangjiang, SUN Tao, et al. Hf-Nd Isotopic Characteristics of the Huangshandong Mafic-Ultramafic Intrusion, Eastern Xinjiang, and Their Geological Implications [J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 145~154.
- 秦克章,唐冬梅,苏本勋,等.北疆二叠纪镁铁-超镁铁岩铜、镍矿床的构造背景、岩体类型、基本特征、相对剥蚀程度、含矿性评价标志及成矿潜力分析[J].西北地质,2012,45(4):83~116.
- QIN Kezhang, TANG Dongmei, SUN Benxun, et al. The Tectonic Setting, Style, Basic Frature, Relative Erosion Deee, Ore-Bearing Evaluation Sign, Potential Analysis of Mineralization of Cu-Ni-Bearing Permian Mafic-Ultramafic Complexes, Northern Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 83~116.
- 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. Research Status and Key Scientific Issues of Magmatic Sulfide Deposits[J]. Ore Deposit Geology, 2019, 38(4): 699~710.
- 孙赫.东天山镁铁-超镁铁岩铜镍硫化物矿床通道式成矿机制与岩体含矿性评价研究[D].北京:中国科学院地质与地球物理研究所,2009,1~262.
- SUN He. Ore-Forming Mechanism in Conduit System and Ore-Bearing Property Evaluation for Mafic-Ultramafic Complex in eastern Tianshan, Xinjiang[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2009, 1~262.
- 王京彬,徐新.新疆北部后碰撞构造演化与成矿[J].地质学报,

- 2006, 80(1): 23–31.
- WANG Jingbin, XU Xin. Post-Collisional Tectonic Evolution and Metallogenesis in Northern Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(1): 23–31.
- 王旋, 曹俊, 张盖之. 造山带铜镍硫化物矿床的岩浆起源: 以东天山黄山南铜镍矿床为例[J]. 地球科学, 2021, 46(11): 3829–3849.
- WANG Xuan, CAO Jun, ZHANG Gaizhi. Origin of Ore-Forming Magmas Associated with Ni-Cu Sulfide Deposits in Orogenic Belts: Case Study of Permian Huangshannan Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit, East Tianshan, NW China[J]. *Earth Science*, 2021, 46(11): 3829–3849.
- 吴元保, 郑永飞. 锌石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589–1640.
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. The Genetic Mineralogy of Zircon and the Constraint to the Interpretation of U-Pb Age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1589–1640.
- 夏明哲. 新疆东天山黄山岩带镁铁-超镁铁质岩石成因及成矿作用[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- XIA Mingzhe. The Mafic-ultramafic Intrusions in the Huangshan Region Eastern Tianshan, Xinjiang: Petrogenesis and Mineralization Implication[D]. Xian: Chang'an University, 2009.
- 肖庆华, 秦克章, 唐冬梅, 等. 新疆哈密香山西铜镍-钛铁矿床系同源岩浆分异演化产物: 矿相学、锌石 U-Pb 年代学及岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 2010, 26(2): 503–522.
- XIAO Qinghua, QIN Kezhang, TANG Dongmei, et al. Xiangshanxi Composite Cu-Ni-Ti-Fe Deposit Belongs to Comagmatic Evolution Product: Evidences from Ore Microscopy, Zircon U-Pb Chronology And Petrological Geochemistry, Hami, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(2): 503–522.
- 尤敏鑫, 李厚民, 王亚磊. 东天山黄山南镁铁-超镁铁岩体的岩浆演化过程: 矿物学、Sr-Nd 同位素特征的指示[J]. 岩石学报, 2018, 34(11): 3422–3432.
- YOU Minxin, LI Houmin, WANG Yalei. Magma evolution of Huangshannan mafic-ultramafic intrusion in East Tianshan region: Indication from mineralogy and Sr, Nd isotopic characteristics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(11): 3422–3432.
- 赵云, 杨永强, 柯君君. 含铜镍岩浆起源及硫饱和机制: 以新疆黄山南岩浆铜镍硫化物矿床 Sr-Nd-Pb-S 同位素和元素地球化学研究为例[J]. 岩石学报, 2016, 32(7): 2086–2098.
- ZHAO Yun, YANG Yongqiang, KE Junjun. Origin of Cu-and Ni-Bearing Magma and Sulfide Saturation Mechanism: A Case Study of Sr-Nd-Pb-S Isotopic Composition and Element Geochemistry on the Huangshannan Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(7): 2086–2098.
- Anders E, Grevesse N. Abundances of The Elements: Meteoritic and Solar[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53: 197–214.
- Barnes S J, Godel B, Gurer D, et al. Sulfide-Olivine Fe-Ni Exchange and the Origin of Anomalously Ni Rich Magmatic Sulfides[J]. *Economic Geology*, 2013, 108(8): 1971–1992.
- Chai G, Naldrett A J. The Jinchuan Ultramafic Intrusion: Cumulate of a High-Mg Basaltic Magma[J]. *Journal of Petrology*, 1992, 33(2): 277–303.
- Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, et al. Zircon U-Pb Ages for the Early Cambrian Time Scale[J]. *Journal of the Geological Society*, 1992, 149: 171–184.
- Deng Y F, Song X Y, Xie W, et al. The Role of external sulfur in triggering sulfide immiscibility at depth: Evidence from the Huangshan-Jingerquan Ni-Cu metallogenetic belt, NW China[J]. *Economic Geology*, 2022, 117: 1867–1879.
- Gao J F, Zhou M F, Lightfoot P C, et al. Sulfide Saturation and Magma Emplacement in the Formation of the Permian Huangshandong Ni-Cu Sulfide Deposit, Xinjiang, Northwestern China[J]. *Economic Geology*, 2013, 108(8): 1833–1848.
- Gao J F, Wang H H. Permian mafic-ultramafic magmatism and sulfide mineralization in the Central Asian Orogenic Belt: A review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2024, 264: 106071.
- Li C S, Zhang Z W, Li W Y, 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. Sulfur Contents at Sulfide-Liquid or Anhydrite Saturation in Silicate Melts: Empirical Equations and Example Applications[J]. *Economic Geology*, 2009, 104(3): 405–412.
- Li C, Ripley E M. The Giant Jinchuan Ni-Cu-(PGE) Deposit: Tectonic Setting, Magma Evolution, Ore Genesis, and Exploration Implications[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2011, 17: 163–180.
- Lightfoot P C, Keays R R. Siderophile and Chalcophile Metal Variations in Flood Basalts from the Siberian Trap, Noril'sk Region: Implications for the Origin of the Ni-Cu-PGE Sulfide Ores[J]. *Economic Geology*, 2005, 100(3): 439–462.
- Mao Y J, Barnes S J, Qin K Z, et al. Rapid Orthopyroxene Growth Induced by Silica Assimilation: Constraints from Sector-Zoned Orthopyroxene, Olivine Oxygen Isotopes and Trace Element Variations in the Huangshanxi Ni-Cu Deposit, Northwest China[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2019, 174(4): 1–24.
- Mao Y J, Qin K Z, Barnes S J, et al. Genesis of the Huangshannan High-Ni Tenor Magmatic Sulfide Deposit in the Eastern Tianshan, Northwest China: Constraints from PGE Geochemistry and Os-S Isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 90: 591–606.
- Mao Y J, Qin K Z, Li C, et al. A modified Genetic Model for the Huangshandong Magmatic Sulfide Deposit in the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, Western China[J]. *Mineralium Deposita*, 2015, 50: 65–82.
- Mao Y J, Qin K Z, Li C, et al. Petrogenesis and Ore Genesis of The Permian Huangshanxi Sulfide Ore-Bearing Mafic-Ultramafic Intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, Western China[J]. *Lithos*, 2014, 201(1): 111–125.
- Mao Y J, Qin K Z, Tang D M, et al. Crustal Contamination and Sulfide Immiscibility History of the Permian Huangshannan Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit, East Tianshan, NW China[J].

- [Journal of Asian Earth Sciences](#), 2016, 129: 22–37.
- Mao Y J, Qin K Z, Tang D M. Revisiting the age and emplacement process of the Huangshandong Ni–Cu deposit in the Central Asian Orogenic belt, northwestern China: Implications for multiple magma extractions from a short-lived staging magma chamber[J]. *Lithos*, 2018, 320–321: 583–591.
- Mao Y J, Schoneveld L, Barnes S J, et al. Coupled Li–P Zoning and Trace Elements of Olivine from Magmatic Ni–Cu Deposits: Implications for Postcumulus Re-Equilibration in Olivine[J]. *Journal of Petrology*, 2022, 63(3): 1–22.
- Mao Y J, Zheng X Y, 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: 577–599.
- Mavrogenes J A, O’neill H S C. The Relative Effects of Pressure, Temperature and Oxygen Fugacity on the Solubility of Sulfide in Mafic Magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63: 1173–1180.
- Mungall J E, Brenan J M. Partitioning of Platinum-Group Elements and Au Between Sulfide Liquid and Basalt and the Origins of Mantle-Crust Fractionation of the Chalcophile Elements[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 125(1): 265–289.
- Naldrett A J. Fundamentals of Magmatic Sulfide Deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2011, 17: 1–50.
- O’neill H S C, Mavrogenes J A. The Sulfate Capacities of Silicate Melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 334: 368–382.
- Roeder P, Emslie R. Olivine-liquid equilibrium[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1970, 29(4): 275–289.
- Ripley E M, Li C. Metallic Ore Deposits Associated with Mafic to Ultramafic Igneous Rocks. Processes and Ore Deposits of Ultramafic-Mafic Magmas Through Space and Time[M]. Amsterdam: Elsevier, 2018. Doi: [10.1016/B978-0-12-811159-8.00004-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811159-8.00004-4).
- Ripley E M, Brophy J G, Li C. Copper Solubility in a Basaltic Melt and Sulfide Liquid/Silicate Melt Partition Coefficients of Cu and Fe[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(15): 2791–2800.
- Rudnick R L, Gao S. Composition of the Continental Crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 3: 1–64.
- Saunders A D, Norry M J, Tarney J. Origin of MORB and Chemically-Depleted Mantle Reservoirs: Trace Element Constraints[J]. *Journal of Petrology*, 1988, Special Lithosphere Issue: 415–445.
- Song X Y, Deng Y F, Xie W, et al. Prolonged basaltic magmatism and short-lived magmatic sulfide mineralization in orogenic belts [J]. *Lithos*, 2021, 390–391: 106114.
- Song X Y, Xie W, Deng Y F, et al. Processes of magmatic sulfide mineralization of the Huangshan-Jingerquan Ni–Cu metallogenic belt, NW China: Insights from reviews of chalcophile elements[J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 158: 105–456.
- Su B X, Qin K Z, Sakyi P A, et al. U-Pb Ages and Hf-O Isotopes of Zircons from Late Paleozoic Mafic-Ultramafic Units in the Southern Central Asian Orogenic Belt: Tectonic Implications and Evidence for an Early-Permian Mantle Plume[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(2): 516–531.
- Sun T, Qian Z Z, Deng Y F, et al. PGE and Isotope (Hf-Sr-Nd-Pb) Constraints on the Origin of the Huangshandong Magmatic Ni–Cu Sulfide Deposit in the Central Asian Orogenic Belt, Northwestern China[J]. *Economic Geology*, 2013, 108: 1849–1864.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics in Ocean Basalt: Implication for Mantle Composition and Processes: Magmatism in The Ocean Basins[M]. London: Geological Society, Special Publication, 1989, 42: 313–345.
- Tang Q, Li C, Ripley E M, et al. Sr-Nd-Hf-O isotope constraints on crustal contamination and mantle source variation of three Fe-Ti-V oxide ore deposits in the Emeishan large igneous province[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, 292: 364–381.
- Williams I S, Claesson S. Isotope Evidence for the Precambrian Province and Caledonian Metamorphism of High Grade Paragneiss from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides, II. Ion Microprobe Zircon U-Th-Pb[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 97: 205–217.
- Williams I S. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe. in McKibben, M. A. and Shanks, W. C. (eds) Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes[J]. *Reviews in Economic Geology*, 1998, 7: 1–35.
- Xiao W J, Zheng Y F, Hou Z Q, et al. Tectonic Framework and Phanerozoic geologic evolution of China[J]. *Society of Economic Geologists Special Publications*, 2019, 22: 21–102.
- Xue S C, Li C, Qin K Z, et al. Geochronological, Mineralogical and Geochemical Studies of Sulfide Mineralization in the Podong Mafic-Ultramafic Intrusion in Northern Xinjiang, Western China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 101: 688–699.
- Xue S C, Wang Q F, Deng J, et al. Mechanism of organic matter assimilation and its role in sulfidesaturation of oxidized magmatic ore-forming system: insights from C-Sr-Nd isotopes of the Tulaergen deposit in NW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2022, 57: 1123–1141.
- Zhang M, Li C, Fu P, et al. The Permian Huangshanxi Cu–Ni Deposit in Western China: Intrusive-Extrusive Association, Ore Genesis, and Exploration Implications[J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46(2): 153–170.
- Zhao Y, Xue C J, Zhao X B, et al. Magmatic Cu–Ni sulfide mineralization of the Huangshannan mafic–ultramafic intrusion, Eastern Tianshan, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 105: 155–172.
- Zhao Y, Xue C, Zhao X, et al. Origin of Anomalously Ni-Rich Parental Magmas And Genesis of the Huangshannan Ni–Cu Sulfide Deposit, Central Asian Orogenic Belt, Northwestern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 77: 57–71.