



引文格式: 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2023082

Citation: 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2023082

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

谢燮¹, 杨建国¹, 张东阳², 程功德³

(1. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430078; 3. 宝鸡西北有色七一七总队有限公司, 陕西 宝鸡 721000)

摘要: 铭杨岩体位于甘肃北山南带古堡泉-红柳园断裂北侧, 侵位于敦煌岩群, 为甘肃北山地区新近发现的一处铜镍矿化镁铁-超镁铁岩体, 主要由辉橄岩、二辉橄榄岩、橄榄辉长岩、辉长岩等组成。全岩成分以低碱、低钛为特征, 轻稀土略富集, 具有明显的正 Eu 异常; 富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Ba、Sr 和 K, 相对亏损高场强元素(HFSE)Th、U、Nb、Ta、Zr 和 Hf。岩浆演化过程中发生了橄榄石、斜长石和辉石的分离结晶作用, 经历了一定程度的地壳混染, 地、物、化、遥综合信息显示具有较好的铜镍成矿潜力。通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 首次获得铭杨岩体中橄榄辉长岩和辉长岩结晶年龄分别为 (452.9 ± 2.4) Ma 和 (457.7 ± 2.1) Ma, 岩体可能为早古生代陆缘裂谷环境下的产物。北山地区早古生代含铜镍岩体的发现对区域构造演化认识具有重要意义。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学特征; 镁铁-超镁铁岩体; 铭杨

中图分类号: P597; P591+.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)01-0179-17

Geochemistry and Zircon U-Pb Dating of the Mingyang Mafic-Ultramafic Rock Complex in Beishan Area of Gansu and Its Prospecting Significance

XIE Xie¹, YANG Jianguo¹, ZHANG Dongyang², CHENG Gongde³

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of CGS, Xi'an 710119, Shaanxi, China;
2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430078, Hubei, China;
3. Baoji No.717 Brigade Company Ltd. of Northwest Nonferrous Metals, Baoji 721000, Shaanxi, China)

Abstract: The Mingyang rock body is a newly discovered copper-nickel mineralized Mafic-Ultramafic rock body, which is located on the north side of the gubaoquan-hongliuyuan Fault in the southern belt of Beishan, Gansu. The rock intruding in the Dunhuang rock group, which mainly composed of gabbro, diabase peridotite, olivine gabbro, gabbro, etc. The rock composition is characterized by low alkali and low titanium, slightly enriched in light rare earths, with obvious positive Eu anomalies; enriched in large ion-lithophile elements (LILE)

收稿日期: 2022-09-02; 修回日期: 2022-11-05; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 中国地质调查局项目“天山-北山成矿带那拉提-营毛沱地区地质矿产调查”(DD20160009), “东天山昌吉-双沟山地区区域地质调查”(DD20190065)联合资助。

作者简介: 谢燮(1982-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事于地质矿产调查研究。E-mail: 77867876@qq.com。

Rb, Ba, Sr and K, and relatively deficient in high field strength elements (HFSE) Th, U, Nb, Ta, Zr and Hf. During the magmatic evolution, the separation and crystallization of olivine, plagioclase and pyroxene occurred, it has experienced a certain degree of assimilation and contamination. The geological, geophysical and geochemical information show that it has the better potential of copper and nickel ore. The first crystallization ages of (452.9 ± 2.4) Ma and (457.7 ± 2.1) Ma for olivine gabbro and gabbro in the Mingyang rock mass were obtained by LA-ICP-MS zircon U-Pb dating. The rocks may be the products of the Early Paleozoic continental margin rifting environment. The discovery of early Paleozoic Cu-Ni-bearing rocks in the Beishan area is of great significance to the understanding of regional tectonic evolution.

Keywords: U-Pb zircon ages; geochemistry; mafic-ultramafic rocks; Mingyang

天山-北山地区横跨新、甘、蒙三省,是中亚造山带南缘镁铁-超镁铁岩体的集中分布区,产出有多处岩浆型铜镍硫化物矿床,代表性矿床如菁布拉克、黄山、黄山南、图拉尔根、坡北、黑山等(王小红等, 2023)。上述典型含矿岩体除西天山菁布拉克形成于早古生代,东天山和北山多数岩体均形成于晚古生代。天山-北山地区含矿岩体在各构造单元中的分布都大致平行于区域性大断裂或板块缝合线(Song et al., 2009, 2011; Qin et al., 2011)。众多学者对区域铜镍硫化物矿床成矿地质背景、矿床成因及成矿潜力开展了大量的研究工作(姜常义等, 2006; 孙赫等, 2007; 苏本勋等, 2009, 2010; Ao et al., 2010; 凌锦兰等, 2011; Su et al., 2012; 秦克章等, 2012; 夏昭德等, 2012)。东天山地区镁铁-超镁铁岩体矿化类型多,组合复杂,形成时期主要集中在 274~300 Ma,其产出构造环境主要有造山带伸展、地幔柱以及地幔柱对造山带的叠置等多种不同认识。新疆北山地区镁铁-超镁铁岩体呈现多期侵入体复合与同期侵入体岩相分带相叠置的复杂结构,形成时期主要集中在 260~289 Ma,岩体形成的构造背景及地幔动力学机制亦存在不同的认识,如岛弧环境(Ao et al., 2010; 颜炜等, 2011)、碰撞造山后伸展环境(李华芹等, 2006, 2009)及地幔柱作用(Qin et al., 2011)。甘肃北山地区岩体形成时期主要集中在 358~398 Ma(杨建国, 2012a, 2016; 谢燮, 2015),相对而言,岩体产出构造环境研究较为薄弱。长期以来,大多数研究者认为甘肃北山地区镁铁-超镁铁岩形成于一种伸展地球动力学背景(汤中立, 1995; 李文渊, 1996; 白云来等, 2002; 杨合群等, 2008)。也有学者认为甘肃北山地区镁铁-超镁铁岩带与新疆北山、东天山地区镁铁-超镁铁岩带是同期相同构造环境的产物(李华芹等, 2009)。Xie 等(2012)通过对黑山岩体的研究认为,该地区泥盆纪—石炭纪火山岩组合具有活

动大陆边缘火山岩特征,其可能形成于与俯冲相关的构造背景机制中。甘肃北山地区与镁铁-超镁铁岩有关的铜镍矿成岩成矿地质背景、岩石成因、成矿机制等研究相对滞后,制约了区域铜镍找矿工作进展。

铭杨岩体为甘肃北山地区新近发现的一处铜镍矿化镁铁-超镁铁岩体,位于甘肃北山南带古堡泉-红柳园断裂北侧,产出位置和形成时代明显不同于区域其他已发现含铜镍矿岩体。笔者通过开展铭杨岩体的岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学等方面的研究,与区内其他含矿岩体进行对比,为该地区镁铁-超镁铁岩体研究及进一步评价岩体含矿性提供基础资料和理论依据,其对甘肃北山地区的铜镍找矿工作具有重要意义。

1 岩体地质特征

铭杨岩体地处柳园西约为 20 km 的骆驼山一带,大地构造位置位于古堡泉-红柳园断裂北侧(图 1)。区内出露地层主要为晚太古代—古元古代敦煌岩群强变形中-深变质岩,岩石组合为大理岩、云母石英片岩、片麻岩、斜长角闪(片)岩、玄武岩等。中酸性及基性、超基性岩体发育,多呈小岩枝、岩株及岩脉产出。含铜镍镁铁-超镁铁岩体出露范围约为 1 km²,侵位于斜长角闪片岩、黑云石英片岩之中,呈 SW-NE 向展布,岩体整体剥蚀较浅,有较多地层残留顶盖。岩性主要由辉长岩、橄榄辉长岩、二辉橄榄岩、辉橄岩、蛇纹岩等组成。岩体侵位至少可分为 4 期:早期为细粒辉长辉绿岩,分布最广,一般无金属硫化物;第二期为中细粒蚀变辉长岩,在岩体中西部见有钒钛磁铁矿化露头;第三期为球形风化中粗粒辉长岩、橄榄辉长岩,分布较广;晚期为超基性岩,仅见于岩体中部低洼处,岩性有辉橄岩、二辉橄榄岩、蛇纹岩等。铜镍矿

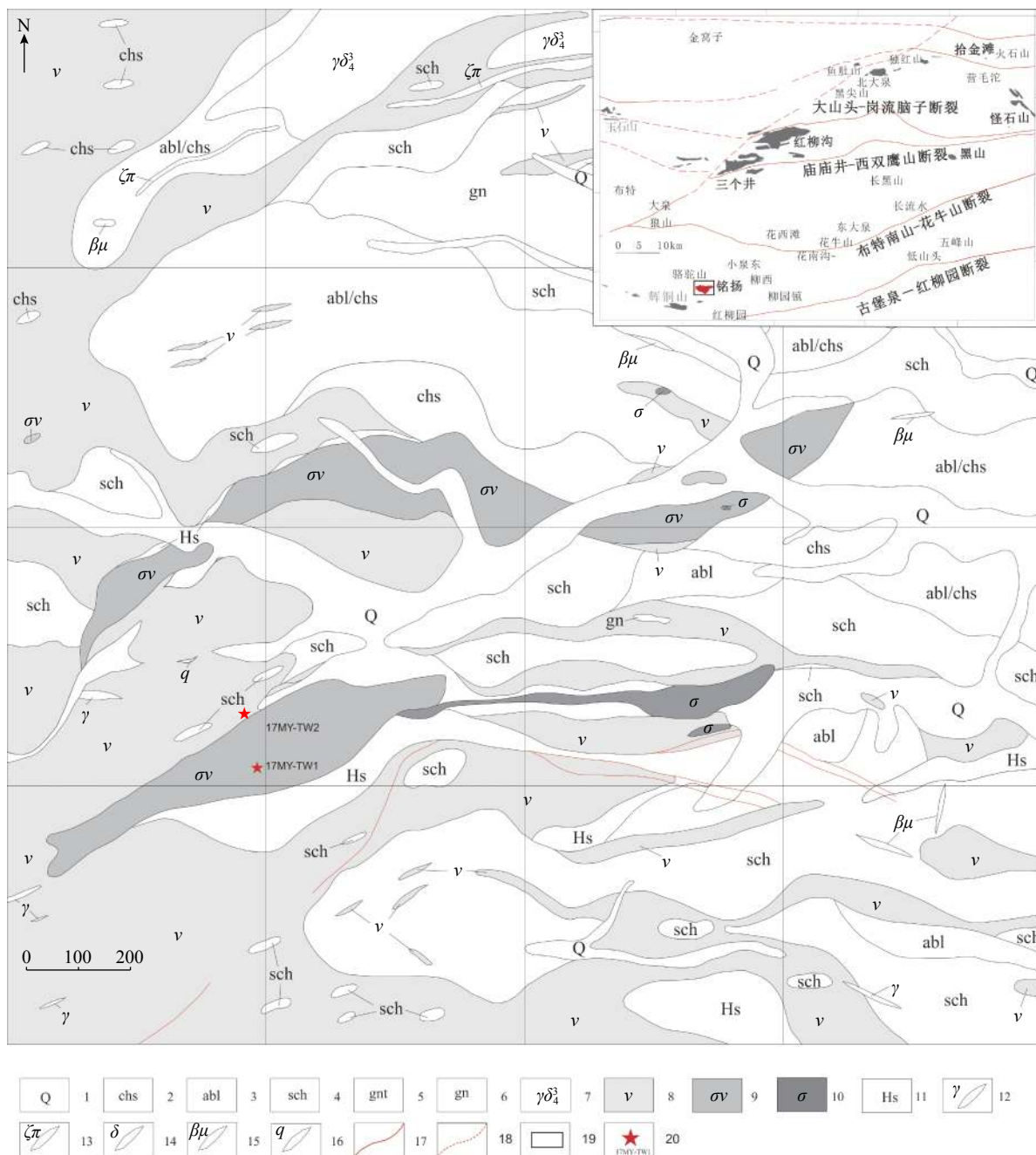


图1 铭杨镁铁-超镁铁岩体地质简图

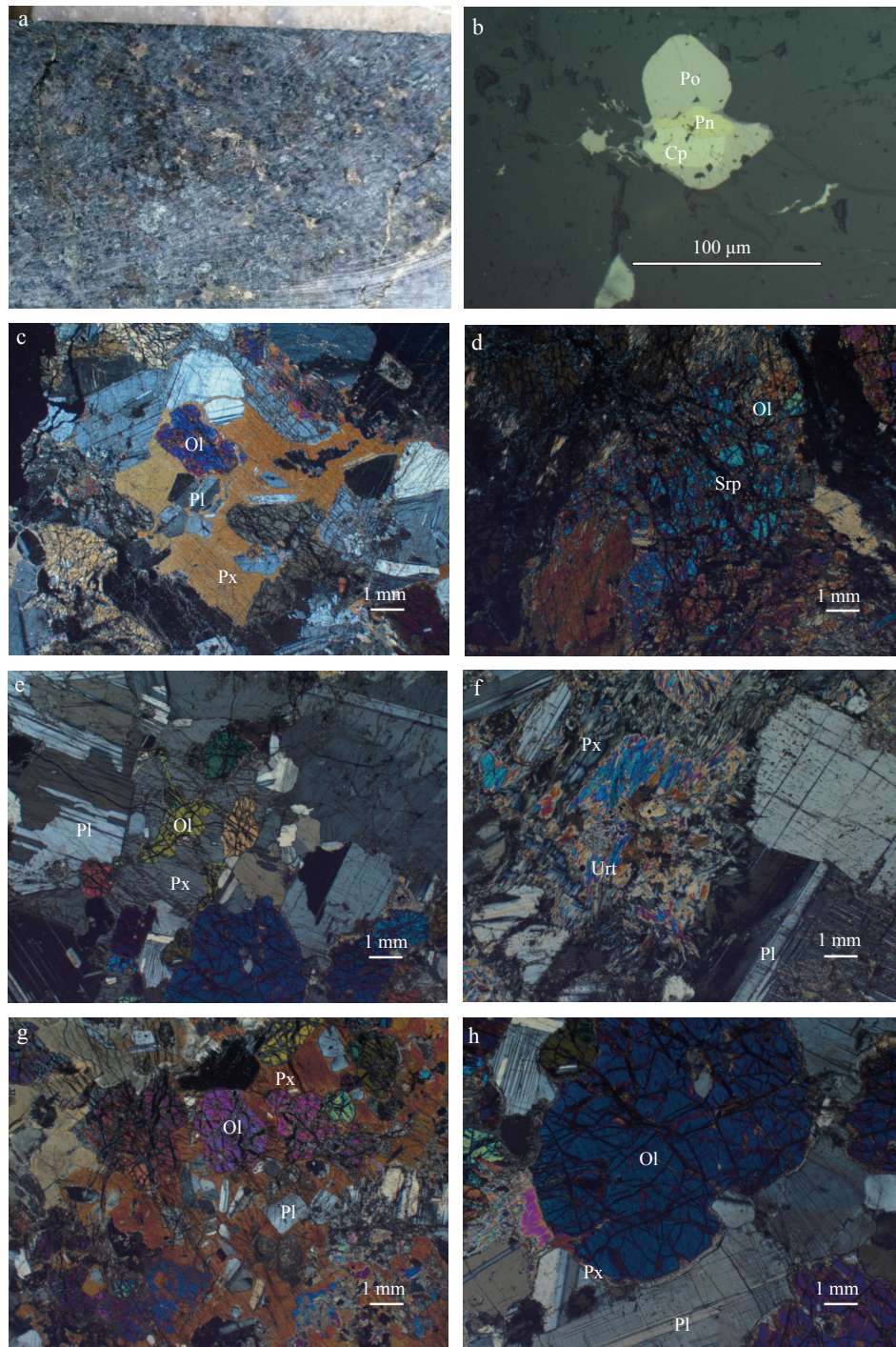
Fig. 1 Geological sketch of the Mingyang intrusion

化主要见于橄榄辉长岩相、辉橄岩相中。

2 岩石学特征

岩石中主要造岩矿物有橄榄石、单斜辉石、斜方辉石、斜长石、角闪石、金云母等。多呈块状构造,常

见包橄结构、含长结构、交代残留结构等特征。各类岩石均发生了不同程度的蚀变作用,主要有辉石闪石化、绿泥石化、滑石化,斜长石钠黝帘石化、绢云母化,橄榄石蛇纹石化、伊丁石化等。金属硫化物以磁黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿、黄铁矿等为主,多呈星点状、细脉状、斑块状及浸染状产出(图2)。岩体中各类岩



a. 橄辉长岩岩心中金属硫化物; b. 辉橄岩中金属硫化物; c. 橄辉长岩(包橄结构、含长结构); d. 辉橄岩(橄榄石蛇纹石化); e. 橄辉长岩(包橄结构); f. 辉长岩(辉石纤闪石化); g. 橄辉长岩(含长结构); h. 橄辉长岩(橄榄石辉石反应边); Po. 磁黄铁矿; Cp. 黄铜矿; Pn. 镍黄铁矿; Ol. 橄榄石; Px. 辉石; Pl. 斜长石; Srp. 蛇纹石; Urt. 纤闪石

图2 铭杨镁铁-超镁铁岩体矿物特征图

Fig. 2 Mineral characteristics of Mingyang intrusion

石岩相特征如下:

辉长岩: 块状构造, 中-粗粒, 矿物成分主要由斜长石、辉石组成, 岩石次生蚀变较为强烈, 斜长石矿物

晶体呈粒状, 大部分晶体发生钠黝帘石化、绢云母化, 有少量斜长石残留; 辉石晶体被纤闪石、褐色角闪石、绿泥石、金云母等矿物交代。

橄榄辉长岩: 块状构造, 粒状结构, 矿物成分主要由斜长石、辉石、橄榄石、尖晶石等组成; 斜长石含量约为 45%, 矿物晶体呈粒状, 粒径大小一般为 0.5~4 mm; 辉石含量约为 35%, 以斜方系列紫苏辉石为主, 少量单斜辉石, 矿物晶体呈不规则粒状, 粒径大小为 0.3~5.5 mm, 晶体中常包裹橄榄石小晶体, 形成包橄结构, 有时也包裹斜长石小晶体, 形成含长结构, 辉石晶体常被褐色角闪石交代, 有时也沿解理被滑石、闪石交代; 橄榄石含量约为 15%, 矿物晶体呈粒状, 粒径大小为 0.3~1.6 mm。

辉橄岩: 块状构造, 矿物成分主要由橄榄石、辉石等组成; 橄榄石含量约为 45%, 矿物晶体呈粒状, 多数晶体被纤维蛇纹石交代, 呈变余网环状结构, 部分晶体残留, 呈交代残留结构, 少数橄榄石被伊丁石交代; 辉石晶体多被纤维闪石交代, 呈交代假象结构, 晶体中常见橄榄石包裹体, 呈变余包橄结构; 岩石中次生矿物还见有金云母, 矿物晶体呈片状, 粒径较粗, 达 1.2~2.5 mm。

二辉橄榄岩: 块状构造, 矿物成分主要由橄榄石和辉石组成; 橄榄石含量约为 65%, 矿物晶体呈粒状, 多被纤维蛇纹石交代, 少量被胶蛇纹石交代, 呈变余网环状结构; 辉石种属为斜方系列顽火辉石与单斜系列普通辉石两类, 晶体多被角闪石交代, 见少量残留, 呈交代残留结构, 此外辉石晶体中常见橄榄石包裹体, 呈包橄结构或变余包橄结构, 少量辉石晶体被金云母交代。

蛇纹岩: 块状构造, 矿物成分主要由蛇纹石组成, 含量达 90%, 其次为绿泥石, 少量滑石。蛇纹石种属以胶蛇纹石为主, 呈胶状变晶结构, 其次为纤维蛇纹石, 呈纤状变晶结构, 岩石在蛇纹石化过程中析出较多铁质, 说明橄榄石种属含铁量较高, 可能为贵橄榄石; 绿泥石集合体呈辉石假象或零星分布; 滑石呈细小鳞片状、或不规则状集合体局部出现, 蚀变矿物种类含量、结构表明原岩为纯橄岩类。

3 分析方法

主量元素和微量元素分析测试工作在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。全岩主元素分析方法为 X 荧光光谱分析(XRF), 精度优于 5%; 稀土、微量元素分析采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定, 相对标准偏差优于 5%。

锆石的分选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。对样品进行清洗后, 粉碎至 80~100 目, 采用重液法和电磁法进行分选, 在双目镜下精选、剔除杂质, 尽量挑选无包裹体、无裂纹和透明度高、晶形完好的锆石颗粒作为测定对象, 然后将其与标准锆石一起制成环氧树脂样品靶, 打磨抛光并使其露出中心部位, 通过扫描电镜进行阴极荧光(CL)成像观察和照相, 以确定单颗粒锆石晶体的形态、结构特征以及标定测年点。锆石 CL 图像在西北大学大陆动力学国家重点实验室电子探针仪加载的阴极发光仪上完成。

锆石 U-Pb 定年测试在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成, 所用仪器为德国 Coherent 公司生产的 GeoLas Pro 型 ARF₂ 准分子激光剥蚀系统及与之配套的美国 Agilent 公司生产的 Agilent 7700x 四极杆等离子质谱仪。锆石定年激光剥蚀所用斑束直径为 25 μm , 频率为 10Hz, 能量密度约为 2.5 J/cm², 以 He 为载气。激光剥蚀采用单点方式, 每个测点总分析时间为 60 s, 其中背景信号 10 s, 样品信号 40 s, 吹扫信号 10 s。锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标, U、Th 含量以锆石 M127($U=923\times 10^{-6}$; $Th=439\times 10^{-6}$; $Th/U=0.475$) (Nasdala et al., 2008) 为外标进行校正, 测试过程中在每测定 5 个样品前后重复测定两个锆石 GJ1 对样品进行校正(李艳广等, 2023), 并测量一个锆石 Plesovice, 观察仪器的状态和测试的重现性, 锆石标准的重现性在 1%(2 σ)左右, 数据处理采用 ICPMSData-Cal 程序(Liu et al., 2008), 锆石年龄谐和图用 Isoplot3.0 程序获得, 表达式中所列单个数据点的误差均为 1 σ , 加权平均年龄具 95% 的置信度。

4 岩体地球化学特征

4.1 主量元素特征

本次共采集岩石样品 9 件。样品中 SiO₂ 含量为 42.95%~45.06%, 整体具有高镁(MgO 含量为 13.51%~29.57%)、低碱(Na₂O+K₂O 含量为 0.5%~2.24%)、低钛(TiO₂ 含量为 0.15%~0.44%)的特征(表 1), 与东天山岩体相似。氧化物质量分数有较大的变化范围, 与岩相学特征相对应; 辉长岩类 MgO(13.51%~17.31%)含量较低, Al₂O₃(14.66%~19.55%)、CaO(8.68%~11.87%)、Na₂O(0.71%~1.32%)含量较高; 辉橄岩具有较高的 MgO(29.57%)含量, 较低的 Al₂O₃(2.32%)、

表 1 铭杨岩体主量元素分析结果表(%)

Tab. 1 Major element content of Mingyang intrusion (%)

样品号	岩石类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	NiO	Cr ₂ O ₃	LOI	Total	m/f	Mg [#]
MZK001-Q2	角闪辉长岩	45.06	19.55	1.04	6.26	11.34	13.51	0.21	1.07	0.37	0.05	0.12	0.03	0.04	1.41	100.06	3.29	0.77
MZK001-Q3	橄榄辉长岩	43.41	18.09	0.87	7.16	9.73	15.01	0.25	1.05	0.17	0.01	0.14	0.03	0.03	3.7	99.65	3.31	0.77
MZK001-Q4	橄榄辉长岩	44.12	18.34	1.34	6.56	10.46	14.52	0.21	1	0.32	0.04	0.13	0.04	0.03	2.62	99.73	3.28	0.77
MZK001-Q5	辉长岩	42.95	17.03	0.87	7.31	9.82	15.53	0.32	0.71	0.4	0.02	0.12	0.04	0.04	4.14	99.3	3.37	0.77
MZK001-Q6	橄榄辉长岩	44.37	16.57	0.75	7.52	10.09	15.87	0.26	0.89	0.44	0.04	0.13	0.03	0.05	2.12	99.13	3.40	0.78
17MYQ1	橄榄辉长岩	43.21	14.66	1.67	7.33	8.68	17.31	0.34	0.87	0.43	0.04	0.14	0.05	0.07	4.25	99.05	3.44	0.78
17MYQ2	辉长岩	44.2	17.06	1.3	6.54	8.72	14.82	0.92	1.32	0.28	0.07	0.13	0.04	0.06	3.87	99.33	3.37	0.77
4 402-Q2	辉橄岩	44.57	2.32	2.63	9.76	2.88	29.57	0.31	0.19	0.15	0.02	0.16	0.05	0.5	5.46	98.57	4.29	0.81
LT-Q1	橄榄辉长岩	44.16	17.36	0.75	6.79	11.87	14.8	0.13	0.83	0.24	0.02	0.12	0.04	0.05	1.84	99	3.48	0.78

CaO(2.88%)、Na₂O(0.19%)含量。岩体m/f值介于3.28~4.29, 属于铁质超基性岩, 各类岩石均具有较高的Mg[#]值(0.77~0.81), 这可能与早期橄榄石堆晶作用有关。

4.2 稀土和微量元素特征

各类岩石稀土总量较低, ΣREE 为 16.17×10⁻⁶~

29.17×10⁻⁶, 轻稀土富集, LREE 为 13.00×10⁻⁶~23.63×10⁻⁶, HREE 为 2.46×10⁻⁶~5.54×10⁻⁶, 稀土元素分馏程度较弱, LREE/HREE 为 4.01~7.42, La_N/Yb_N 为 3.48~7.77, δEu 为 0.6~1.45, δCe 为 0.91~1.01(表 2)。球粒陨石标准化 REE 分布曲线较为一致, 轻重稀土分异明显, 轻稀土分布曲线右倾, 重稀土分布曲线相对平坦,

表 2 铭杨岩体稀土元素分析结果表(10⁻⁶)

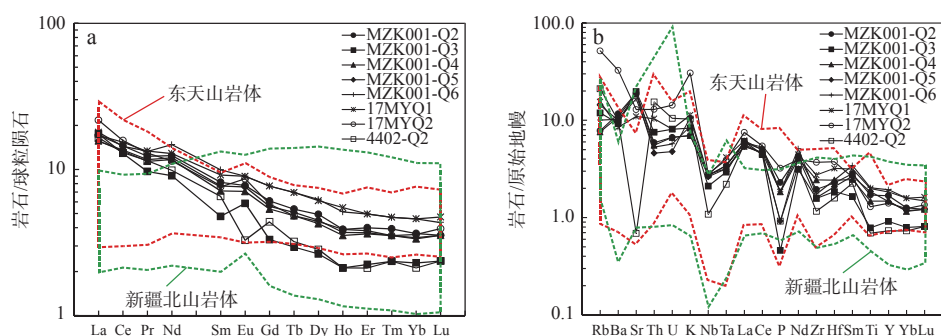
Tab. 2 REE element content of Mingyang intrusion (10⁻⁶)

样品号	MZK001-Q2	MZK001-Q3	MZK001-Q4	MZK001-Q5	MZK001-Q6	17MYQ1	17MYQ2	4 402-Q2	LT-Q1
样品名	角闪辉长岩	橄榄辉长岩	橄榄辉长岩	辉长岩	橄榄辉长岩	橄榄辉长岩	辉长岩	辉橄岩	橄榄辉长岩
La	4.07	4.15	3.71	3.69	4.05	4.25	5.15	3.9	2.28
Ce	8.87	7.88	8.16	8.3	9.38	8.8	9.65	7.95	5.21
Pr	1.17	0.92	1.08	1.11	1.26	1.27	1.23	1.09	0.68
Nd	5.8	4.23	5.45	5.6	6.9	6	5.33	4.6	3.65
Sm	1.25	0.73	1.09	1.18	1.52	1.4	1.16	1	0.83
Eu	0.45	0.34	0.41	0.44	0.52	0.52	0.5	0.19	0.35
Gd	1.25	0.68	1.1	1.15	1.58	1.58	1.19	0.9	0.86
Tb	0.2	0.11	0.18	0.19	0.26	0.26	0.18	0.12	0.14
Dy	1.25	0.67	1.08	1.14	1.58	1.55	1.12	0.72	0.89
Ho	0.22	0.12	0.2	0.21	0.29	0.31	0.22	0.12	0.17
Er	0.66	0.37	0.6	0.61	0.82	0.82	0.63	0.35	0.5
Tm	0.1	0.06	0.09	0.09	0.12	0.12	0.09	0.06	0.07
Yb	0.62	0.39	0.57	0.58	0.78	0.78	0.61	0.36	0.47
Lu	0.09	0.06	0.09	0.09	0.11	0.12	0.1	0.06	0.07
Y	7.62	4.15	6.71	6.63	8.81	8.35	6.39	3.33	4.61
ΣREE	26.00	20.71	23.81	24.38	29.17	27.78	27.16	21.42	16.17
LREE	21.61	18.25	19.90	20.32	23.63	22.24	23.02	18.73	13.00
HREE	4.39	2.46	3.91	4.06	5.54	5.54	4.14	2.69	3.17
LREE/HREE	4.92	7.42	5.09	5.00	4.27	4.01	5.56	6.96	4.10
La _N /Yb _N	4.71	7.63	4.67	4.56	3.72	3.91	6.06	7.77	3.48
δEu	1.09	1.45	1.13	1.14	1.02	1.06	1.29	0.60	1.26
δCe	0.98	0.95	0.99	1.00	1.01	0.92	0.91	0.93	1.01

大部分样品具有明显正铕异常, $\delta(\text{Eu})$ 正异常可能由斜长石堆晶引起。与东天山岩体相比稀土元素总和配分形式基本一致, 但明显不同于新疆北山岩体的 LREE 亏损-平坦型球粒陨石标准化配分曲线(图 3a)。

各类岩石微量元素原始地幔配分曲线较为一致, 配分曲线右倾, 强不相容元素分布曲线整体呈不规则波动。大离子亲石元素 Rb、Ba、Sr、K 相对富集, 但富

集程度明显不同, 高场强元素 Th、U、Nb、Ta、Zr、Hf 相对亏损(表 3), 并显示出 P、Ti 的负异常特征。辉长岩、橄榄辉长岩样品具有明显的 Sr 正异常, 表明岩浆演化过程中有斜长石的堆晶作用发生。与东天山和新疆北山地区岩体对比, 相对富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 具有相似明显的 Nb、Ta 负异常的特征(图 3b)。



球粒陨石和原始地幔标准化数据据 Sun 等(1989); 东天山岩体数据据孙赫(2006)、

夏明哲(2009); 新疆北山岩体数据据凌锦兰(2011)、夏昭德(2012)

图3 铭杨岩体稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 3 (a) Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle normalized spider diagram of trace elements in Mingyang intrusion

表 3 铭杨岩体微量元素分析结果表(10^{-6})

Tab. 3 Trace elements content of Mingyang intrusion (10^{-6})

样品号	MZK001-Q2	MZK001-Q3	MZK001-Q4	MZK001-Q5	MZK001-Q6	17MYQ1	17MYQ2	4402-Q2	LT-Q1
岩石类型	角闪辉长岩	橄榄辉长岩	橄榄辉长岩	辉长岩	橄榄辉长岩	橄榄辉长岩	辉长岩	辉长岩	橄榄辉长岩
Cu	27.8	18.3	17.4	86.1	32.2	62.7	24.3	157	35.5
Ni	235.74	235.74	314.32	314.32	235.74	392.9	314.32	392.9	314.32
Pb	2.47	3.68	12.7	3.63	2.72	4.61	4.97	1.86	2.15
Zn	49.1	63.8	61.9	54.3	55.4	68.6	71.4	75.4	46
Co	52.3	63.1	58.7	65.1	64.6	77.4	65.5	140	57.1
Li	4.48	12.3	3.16	3.99	6.83	4.4	25.3	3.97	4.08
Rb	4.96	7.56	4.82	9.1	6.37	9.82	32.8	13.4	2.82
Cs	0.46	1.08	0.89	1.11	1.44	2.67	1.93	2.29	0.44
Sr	402	416	403	391	351	231	272	14.5	332
Ba	81.3	64.6	75.5	69.8	71.7	59.1	228	69.6	46.6
V	80.6	38.6	64	71.4	99.6	90.8	64	168	71.3
Sc	14.5	9.72	13.4	14.2	18.9	16.4	14.8	20.4	20.5
Nb	1.92	1.5	1.99	1.87	1.94	1.94	2.01	0.77	0.81
Ta	0.14	0.12	0.13	0.13	0.14	0.17	0.16	0.09	0.08
Zr	21.8	17.6	27.3	17.9	19.5	30.6	41.4	13	11.8
Hf	0.7	0.57	0.75	0.64	0.75	0.99	1.16	0.49	0.45
Be	0.26	0.27	0.23	0.25	0.26	0.35	0.38	0.25	0.14
Ga	16.1	13.2	14.2	12.7	13.2	12.3	13.6	3.38	12.1
U	0.14	0.17	0.14	0.1	0.12	0.17	0.3	0.22	0.07
Th	0.5	0.64	0.47	0.39	0.45	0.88	1.1	1.31	1.08

5 锆石 U-Pb 测年

5.1 样品采集及特征

锆石同位素测年样品采自地表探槽揭露的橄榄辉长岩(17MY-TW1)和辉长岩(17MY-TW2)。橄榄辉长岩呈深灰绿色,块状构造,中细粒状结构;辉长岩呈浅灰绿色,块状构造,变余粒状结构,次生蚀变较强,其中斜长石晶体普遍发生钠黝帘石化、绢云母化,辉石被纤闪石、角闪石、绿泥石、金云母等矿物交代。两个样品相对新鲜干净,分别重约为 30 kg。

5.2 分析结果

橄榄辉长岩锆石颗粒粒径为 50~200 μm , 多呈

自形-半自形粒状或短柱状,各锆石的内部结构相似,大多数锆石内部发育岩浆韵律环带。根据阴极发光图像(图 4)和锆石镜下特征,选取晶形完整,自形程度较好,颗粒较大的 30 颗锆石进行测试, Th/U 值为 0.23~4.58, 除一个样品外,均大于 0.4,具有典型的基性岩浆成因锆石的特征。个别分析点由于 U 含量或普通 Pb 含量较高,和谐度较低,其余 16 个测点较为集中的分布在谐和线上,显示出良好的谐和性(图 5),表明锆石在形成其 U-Pb 体系一直保持在封闭状态,基本没有 Pb 的丢失,数据给出的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(448.3\pm 10.71)\sim(460.3\pm 6.59)\text{Ma}$ (表 4), 加权平均值为 $(452.9\pm 2.4)\text{Ma}$, 代表了橄榄辉长岩的岩浆结晶年龄。

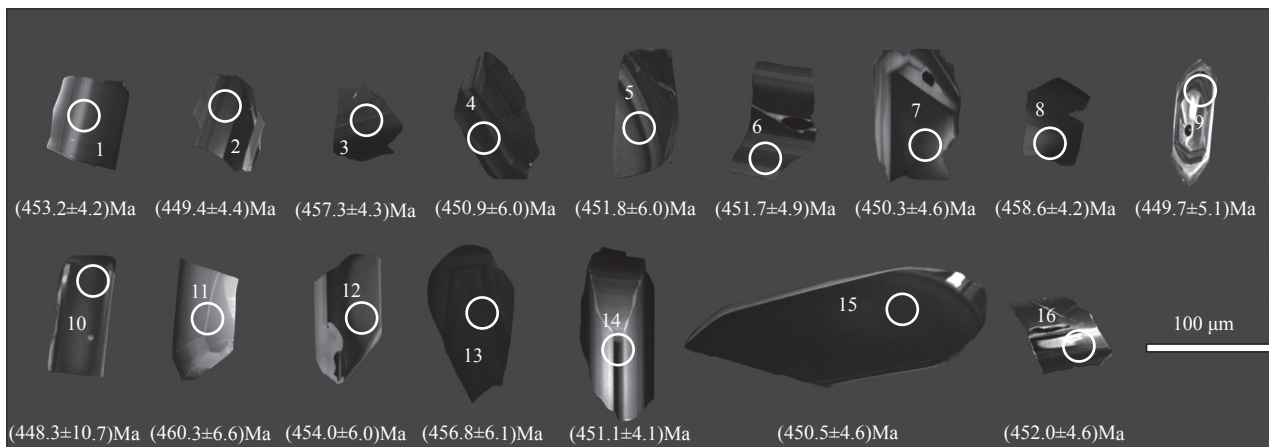


图4 铭杨岩体橄榄辉长岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 4 CL images of zircon from olivine-gabbro of Mingyang intrusion

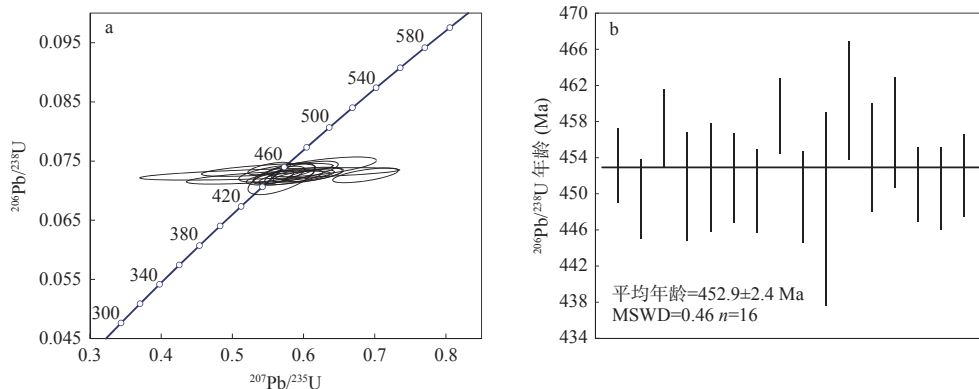


图5 铭杨岩体橄榄辉长岩锆石 U-Pb 谐和图(a)和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权图(b)

Fig. 5 (a) U-Pb concordia diagram and (b) Weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of zircon from olivine-gabbro of Mingyang intrusion

辉长岩中锆石颗粒粒径为 40~100 μm , 多呈自形-半自形粒状或短柱状,各锆石的内部结构相似,具有岩浆韵律环带特征。根据阴极发光图像(图 6)和锆石镜下特征,选取晶形完整,自形程度较好,颗粒较大的

36 颗锆石进行测试, Th/U 值为 0.35~1.80, 除一个样品外,均大于 0.4,具有典型的基性岩浆成因锆石的特征(王梓桐等, 2022; 熊万宇康等, 2023)。个别分析点由于 U 含量或普通 Pb 含量较高,和谐度较低,其余

表 4 铭扬岩体橄榄辉长岩 LA-ICP-MS U-Pb 锆石年龄分析结果表

Tab. 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of olivine-gabbro from Mingyang intrusion

测点号	含量 (10^{-6})			Th/U	比值						年龄 (Ma)					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
1	670.8	773.6	328.7	2.35	0.054	0.001	0.552	0.121	0.073	0.001	383.4	51.8	446.6	79.0	453.2	4.2
2	399.0	435.7	301.0	1.45	0.054	0.002	0.537	0.067	0.072	0.001	353.8	50.9	436.5	44.3	449.4	4.4
3	411.6	433.9	346.8	1.25	0.054	0.003	0.549	0.061	0.074	0.001	368.6	111.1	444.5	40.1	457.3	4.3
4	507.4	593.0	472.5	1.26	0.059	0.003	0.588	0.045	0.072	0.001	572.3	92.6	469.5	28.9	450.9	6.0
4	451.0	517.0	371.6	1.39	0.056	0.002	0.565	0.024	0.073	0.001	472.3	82.4	455.1	15.7	451.8	6.0
6	386.9	387.2	262.0	1.48	0.069	0.003	0.687	0.030	0.073	0.001	901.9	100.0	531.0	18.3	451.7	4.9
7	834.7	945.0	463.5	2.04	0.056	0.001	0.566	0.014	0.072	0.001	477.8	38.0	455.3	8.8	450.3	4.6
8	421.9	470.5	368.0	1.28	0.054	0.002	0.552	0.020	0.074	0.001	388.9	81.5	446.3	13.1	458.6	4.2
9	162.7	156.6	661.8	0.24	0.057	0.002	0.582	0.030	0.072	0.001	505.6	85.2	465.8	19.1	449.7	5.1
10	631.7	757.4	543.9	1.39	0.057	0.002	0.569	0.031	0.072	0.002	479.7	90.7	457.4	20.1	448.3	10.7
11	184.5	188.2	153.9	1.22	0.061	0.005	0.625	0.051	0.074	0.001	642.6	160.2	493.3	31.8	460.3	6.6
12	504.2	596.1	355.1	1.68	0.056	0.003	0.563	0.036	0.073	0.001	455.6	124.1	453.4	23.1	454.0	6.0
13	956.0	1 270.0	444.8	2.86	0.059	0.003	0.602	0.031	0.073	0.001	588.9	98.1	478.3	19.7	456.8	6.1
14	549.9	664.6	308.9	2.15	0.059	0.002	0.600	0.028	0.072	0.001	588.9	75.9	477.4	18.0	451.1	4.1
15	692.9	930.8	497.0	1.87	0.057	0.002	0.572	0.028	0.072	0.001	476.0	86.1	459.5	18.1	450.5	4.6
16	1 509.6	2 332.8	509.7	4.58	0.061	0.002	0.615	0.026	0.073	0.001	627.8	53.7	486.6	16.5	452.0	4.6

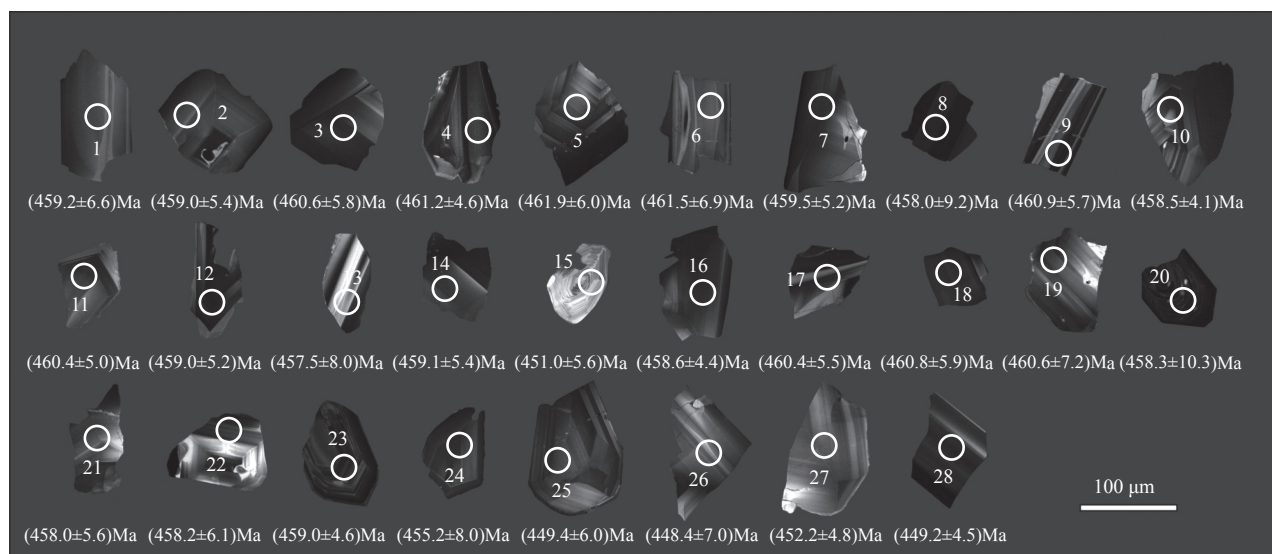


图 6 铭扬岩体辉长岩锆石阴极发光 (CL) 图像

Fig. 6 CL images of zircon from gabbro of Mingyang intrusion

28 个测点较为集中的分布在谐和线上, 显示出良好的谐和性(图 7), 表明锆石在形成其 U-Pb 体系一直保持在封闭状态, 基本没有 Pb 的丢失, 数据给出的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 (448.4±6.96)~(461.9±5.98) Ma(表 5), 加权平均值为 (457.7±2.1) Ma, 代表了辉长岩的岩浆结晶年龄。

6 讨论

6.1 岩石成因

岩石矿物组合变化显示分离结晶矿物为橄榄石、

辉石和斜长石, 岩石中橄榄石常被辉石矿物晶体包裹形成包橄结构, 部分斜长石晶体被辉石晶体包裹形成含长结构(图 2), 由此表明辉石结晶晚于橄榄石及部分斜长石。SiO₂ 与 MgO 质量分数呈负相关, Ni 与 MgO 质量分数呈正相关(图 8a、图 8b), 表明岩浆演化过程中发生了橄榄石的分离结晶; Al₂O₃、CaO、Na₂O 与 MgO 质量分数均呈负相关(图 8c、图 8d、图 8e), 多数岩石样品显示出正的 Eu 异常和 Sr 异常, 说明岩浆演化过程中有斜长石的堆晶作用发生; TFe 与 MgO 质量分数呈正相关, δEu 与 CaO 质量分数呈正相关(图 8f、图 8g), 显示出有单斜辉石的分离结晶。岩石

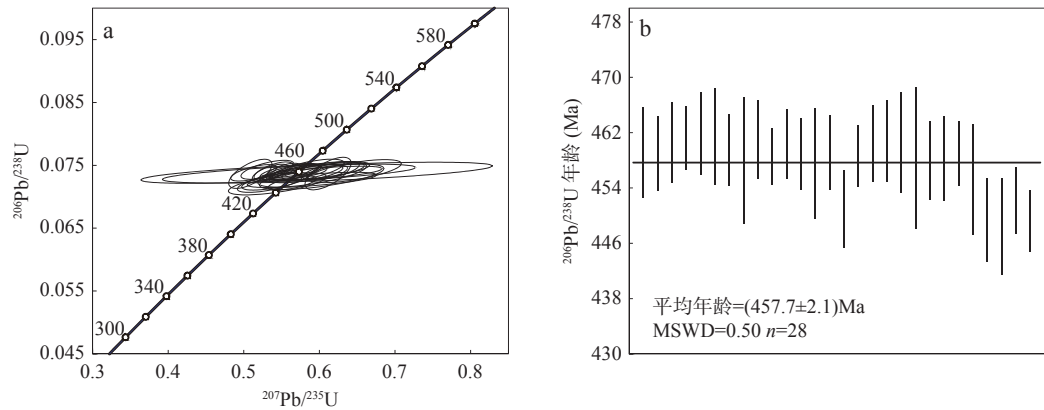


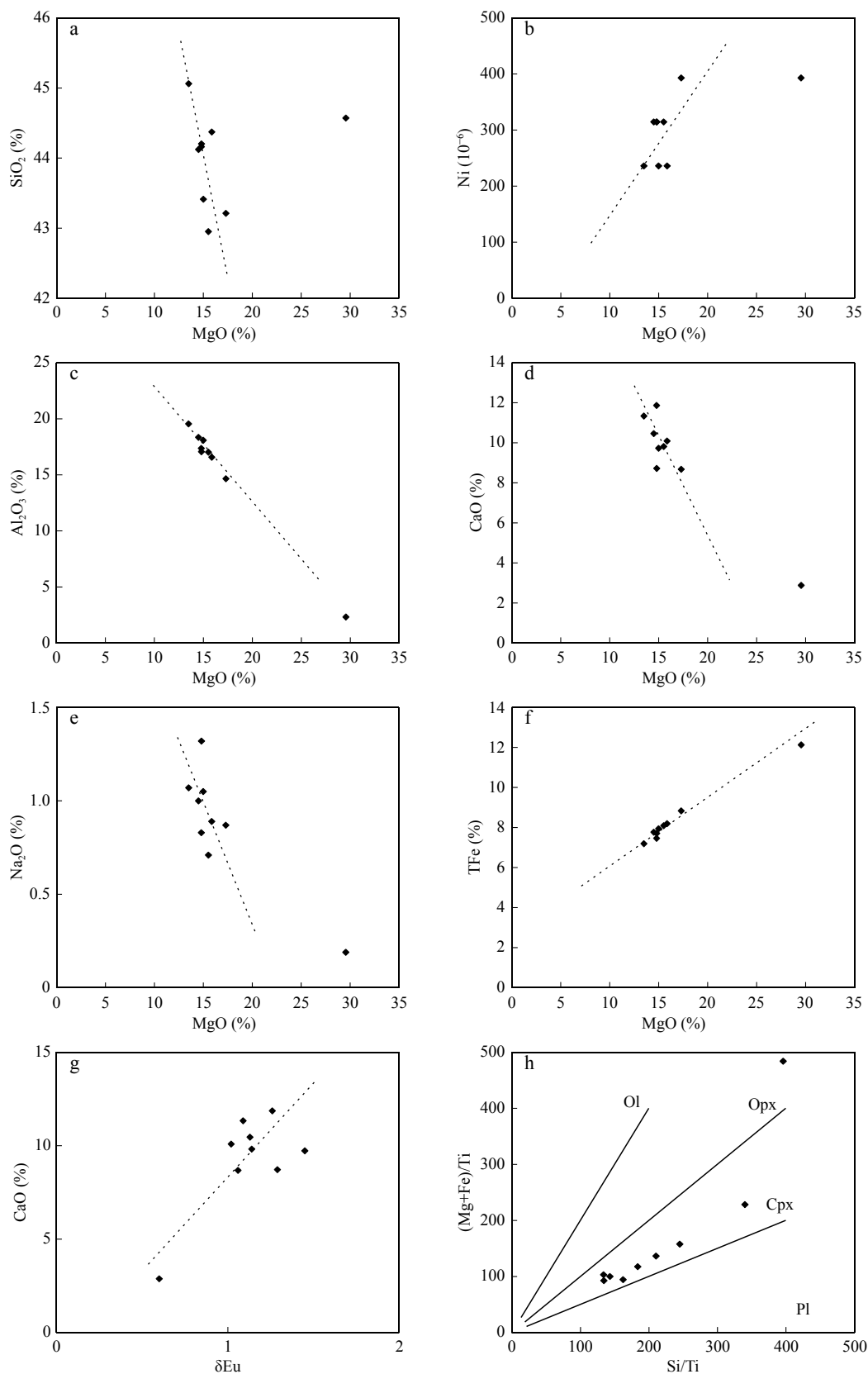
图7 铭杨岩体辉长岩锆石 U-Pb 谐和图(a)和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权图(b)

Fig. 7 (a) U-Pb concordia diagram and (b) Weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of zircon from gabbro of Mingyang intrusion

表 5 铭杨岩体辉长岩 LA-ICP-MS U-Pb 锆石年龄分析结果表

Tab. 5 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of gabbro from Mingyang intrusion

测点号	含量(10^{-6})			Th/U	比值								年龄(Ma)							
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ				
1	40.0	214.4	186.6	1.15	0.062	0.015	0.611	0.144	0.074	0.001	661.1	558.1	483.9	91.1	459.2	6.6				
2	89.9	428.6	374.0	1.15	0.053	0.001	0.535	0.016	0.074	0.001	309.3	55.6	435.2	10.4	459.0	5.4				
3	132.1	771.2	564.9	1.37	0.053	0.001	0.539	0.017	0.074	0.001	316.7	55.6	438.0	11.2	460.6	5.8				
4	123.3	678.6	672.4	1.01	0.054	0.001	0.553	0.015	0.074	0.001	364.9	71.3	446.7	9.5	461.2	4.6				
5	66.2	315.0	246.6	1.28	0.052	0.002	0.531	0.023	0.074	0.001	279.7	88.9	432.6	15.2	461.9	6.0				
6	37.8	224.1	226.3	0.99	0.057	0.002	0.585	0.031	0.074	0.001	483.4	100.9	467.9	20.1	461.5	6.9				
7	72.4	400.2	371.0	1.08	0.055	0.001	0.568	0.023	0.074	0.001	427.8	59.3	456.8	14.7	459.5	5.2				
8	212.1	1585.6	911.5	1.74	0.050	0.001	0.509	0.019	0.074	0.002	198.2	36.1	417.6	12.7	458.0	9.2				
9	40.0	168.8	340.1	0.50	0.059	0.004	0.601	0.044	0.074	0.001	550.0	140.7	477.6	27.7	460.9	5.7				
10	90.0	503.3	407.2	1.24	0.056	0.002	0.570	0.026	0.074	0.001	453.8	81.5	457.8	17.1	458.5	4.1				
11	76.8	462.2	372.4	1.24	0.055	0.002	0.561	0.026	0.074	0.001	409.3	67.6	452.2	17.0	460.4	5.0				
12	190.4	1116.2	618.7	1.80	0.050	0.001	0.513	0.020	0.074	0.001	209.3	25.0	420.7	13.6	459.0	5.2				
13	53.0	322.6	251.0	1.29	0.057	0.004	0.591	0.047	0.074	0.001	509.3	137.9	471.2	30.3	457.5	8.0				
14	90.7	454.6	353.7	1.29	0.055	0.002	0.562	0.024	0.074	0.001	433.4	60.2	452.9	15.8	459.1	5.4				
15	30.0	159.0	240.4	0.66	0.054	0.002	0.541	0.029	0.072	0.001	368.6	106.5	439.2	19.1	451.0	5.6				
16	109.1	591.5	438.7	1.35	0.059	0.005	0.601	0.054	0.074	0.001	561.1	187.9	478.1	34.1	458.6	4.4				
17	55.4	295.4	311.0	0.95	0.058	0.003	0.605	0.036	0.074	0.001	542.6	108.2	480.4	22.8	460.4	5.5				
18	98.5	517.6	370.1	1.40	0.060	0.002	0.615	0.025	0.074	0.001	611.1	77.8	486.9	15.6	460.8	5.9				
19	44.4	363.1	302.5	1.20	0.062	0.003	0.647	0.041	0.074	0.001	664.8	100.9	506.3	25.2	460.6	7.2				
20	143.5	518.6	1470.3	0.35	0.060	0.001	0.612	0.020	0.074	0.002	594.5	35.2	484.6	12.7	458.3	10.3				
21	62.3	296.2	271.4	1.09	0.057	0.003	0.582	0.032	0.074	0.001	509.3	119.4	465.9	20.7	458.0	5.6				
22	92.0	464.2	383.3	1.21	0.053	0.011	0.546	0.120	0.074	0.001	331.5	407.4	442.2	79.0	458.2	6.1				
23	87.6	364.5	674.9	0.54	0.060	0.001	0.611	0.018	0.074	0.001	587.1	46.3	483.9	11.1	459.0	4.6				
24	186.3	994.0	753.6	1.32	0.058	0.003	0.603	0.054	0.073	0.001	516.7	124.1	479.2	34.4	455.2	8.0				
25	63.3	358.1	287.4	1.25	0.054	0.003	0.535	0.028	0.072	0.001	361.2	111.1	434.8	18.8	449.4	6.0				
26	28.2	189.7	184.5	1.03	0.055	0.004	0.545	0.043	0.072	0.001	433.4	165.7	441.4	28.1	448.4	7.0				
27	66.5	352.9	272.4	1.30	0.059	0.006	0.590	0.057	0.073	0.001	564.9	211.1	471.0	36.1	452.2	4.8				
28	123.6	701.3	456.9	1.54	0.056	0.001	0.564	0.021	0.072	0.001	472.3	57.4	454.2	13.8	449.2	4.5				



Ol.橄榄石; Opx.斜方辉石; Cpx.单斜辉石; Pl.斜长石

图8 铭杨岩体分离结晶作用判别图

Fig. 8 Discrimination diagrams for fractional crystallization processes of Mingyang intrusion

地球化学数据分析结果表现出与矿物分离结晶作用相一致的特征,岩浆演化过程中主要发生了橄榄石、斜长石、辉石等矿物的分离结晶作用,并且对岩石的化学成分产生了不同程度的影响。在 $(\text{Mg}+\text{Fe})/\text{Ti}-\text{Si}/\text{Ti}$ 图解上(图 8h),样品大部分落在单斜辉石和斜方辉石控制线之间,表明单斜辉石和斜方辉石是主要的分离结晶相,其次伴有少量橄榄石的分离结晶。

样品的 $\text{Th}/\text{Zr}-\text{Ce}/\text{Pb}$ 、 $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Ta}/\text{Yb}$ 、 $\text{Th}/\text{Y}-\text{Nb}/\text{Y}$ 、 $\text{Nb}/\text{Ta}-\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ 局部具有一定的相关性,整体相关性不强(图 9),表明岩浆演化过程中同化混染作用较弱。洋中

脊玄武岩和洋岛玄武岩的 $\text{Nb}/\text{U}=47\pm 10$,原始地幔中 $\text{Nb}/\text{U}=34$,大陆地壳的 $\text{Nb}/\text{U}=9\sim 12$,典型地幔的 $\text{Ce}/\text{Pb}=25\pm 5$,地壳 $\text{Ce}/\text{Pb}<15$ (Hofmann, 1988; Sun et al., 1989)。铭杨岩体的 Ce/Pb 值为 $0.64\sim 4.27$ 、 Nb/U 值为 $3.5\sim 18.7$,明显不同于典型地幔的相应值,而与地壳具有亲和性。岩体的 Th/Yb 值($0.58\sim 3.64$,平均 1.49)和 Nb/Yb 值($1.72\sim 3.85$,平均 2.87)与洋岛玄武岩相比(分别为 1.9 和 22.2)较低,岩体大离子亲石元素具不同程度的富集,显著亏损 Nb、Ta,并具有 Zr、Hf、P、Ti 负异常,以上特征显示出岩浆源区可能受到地壳物质混染。

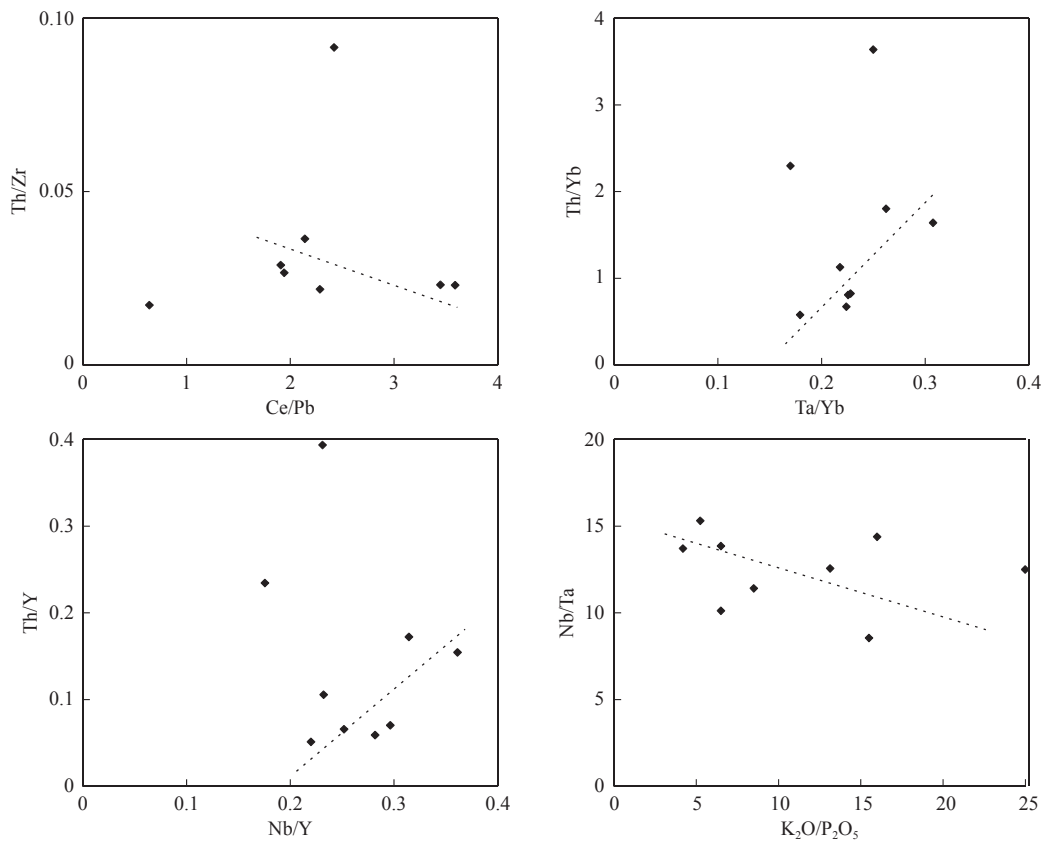


图9 铭杨岩体同化混染作用判别图

Fig. 9 Discrimination diagrams for crustal contamination of the Mingyang intrusion

6.2 地质意义

北山地区构造演化经历了前大陆地壳基底演化,超大陆裂解和洋陆演化,碰撞期后板内伸展和陆内叠覆造山等 4 个重要时期(徐学义等, 2008)。古生代北山及其邻区主要经历了古陆裂解及洋盆扩张、板块俯冲及碰撞造山和陆内裂谷 3 个构造演化阶段(杨合群等, 2008)。

早古生代是北山地壳演化的转折点,红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带的年代学研究表明,北山洋盆

存续时间集中于早寒武世—晚奥陶世,现今表现为早古生代代表洋壳残余的蛇绿岩(王国强等, 2021)。早寒武世北山地区古陆开始裂解,区域上沉积了一套含磷、砷、铀、锰等的陆源碎屑岩、碳酸盐岩及少量硅质岩,与下伏震旦纪冰碛岩呈过渡关系(何世平, 2002; 杨合群等, 2008)。奥陶纪古陆进一步裂解及洋盆扩张,岩石建造复杂多变,沉积作用类型丰富,从浅水环境到深水环境均有发育。在研究区北部的花牛山地区发育有浅海碎屑岩—碳酸盐岩系,夹硅质岩、少量火

山岩, 沉积岩中夹有生物透镜体, 产小型腕足及三叶虫化石(左国朝等, 2011), 拉张环境下产出有亚碱性拉板玄武岩系列的花牛山群火山岩(余吉远等, 2015), 区域上花牛山群原岩自上而下为深海相砂泥质建造、半深海硅质岩建造、浅海相硅泥质与含镁碳酸盐岩建造, 沉积环境表现为一个完整的裂谷沉积旋回, 中酸性火山岩总体上表现为典型的裂谷型双峰式碱性-钙碱性火山活动特征。志留纪期间洋盆发生大规模俯冲作用, 红柳园地区三个井组和墩墩山群记录了北山古生代洋盆演化过程中洋-陆转化痕迹(夏林圻, 2007; 徐学义, 2008; 杨合群, 2010)。晚志留世, 北山古生代洋盆已经消亡, 形成以三个井组为标志的前陆盆地沉积序列, 三个井组砾岩的硅质岩砾石中发现有奥陶纪—志留纪放射虫。晚泥盆世, 北山及邻区已进入晚古生代碰撞后板内伸展阶段, 沿墩墩山一带形成墩墩山组陆相火山-沉积岩系底部的退积型盆地沉积充填序列(何世平, 2004; 李向民, 2011; 梁积伟, 2020)。

岩浆铜镍矿床的形成具有其独特的成矿地质背景和岩浆岩成矿专属性, 甘肃北山地区已发现的铜镍矿化岩体多位于区域古老地块边缘, 受控制于分隔微地块或裂谷带的深大断裂, 不同时期边缘深大断裂成为区内铜镍矿化基性-超基性岩形成的主要导岩、导矿构造。锆石 U-Pb 同位素测年数据显示, 区域已发现的含铜镍岩体形成多集中于中—晚泥盆世, 主要为多期次侵入的铁质系列基性-超基性杂岩体, 岩体规模小—中等, 面积为 10~30 km², 铜镍矿化岩体主要形成于板内伸展作用阶段(杨建国, 2012b; 谢燮, 2016)。本次对位于甘肃北山南带的铭杨岩体开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年工作, 获得橄榄辉长岩和辉长岩的结晶年龄分别为(452.9±2.4)Ma 和 (457.7±2.1)Ma, 属晚奥陶世, 与区域上花牛山群玄武岩为同时代产物, 结合北山地区构造演化认识, 铭杨岩体可能形成于早古生代陆缘裂谷伸展环境下。其形成时代不同于天山-北山地区以往已发现的大多数岩浆型铜镍硫化物矿床, 早古生代含铜镍镁铁-超镁铁岩体的发现对进一步深入认识北山地区构造演化具有重要意义, 在今后的铜镍找矿工作中值得关注。

6.3 成矿潜力

近年来, 甘肃北山地区勘查评价或新发现的含铜镍镁铁-超镁铁岩体, 主要位于大山头-黑山一带, 岩体侵位于布特-黄草滩微地块及其南北两侧的裂谷裂陷带中, 多受庙庙井-西双鹰山及其次级断裂控制, 由

西至东依次出露有红柳沟、三个井、黑山、怪石山、拾金滩等岩体。铭杨岩体位于南侧的明舒井-低山头微陆块内, 产出位置不同于区内其他已知含铜镍矿岩体。

大山头-黑山一带镁铁-超镁铁岩体主要由橄榄岩、辉石岩、橄长岩、辉长岩等组成, 岩类组合复杂多样, 岩相十分发育, 具有明显的分异特征, 岩体具多期次侵位特点, 超基性岩相和辉长岩相之间呈明显的侵入接触关系。岩石中常见辉长结构、包橄结构等, 成矿岩体岩石普遍发生了不同程度的蛇纹石化、纤闪石化、绿泥石化等蚀变作用; 各类岩石以斜长石为特征, 普遍含有较多的褐色普通角闪石、金云母等富水矿物。岩体整体都具有高 Mg、低碱、低 Ca、低 Ti 特征, 大离子亲石元素相对富集, 高场强元素(Nb、Zr、Hf)的相对亏损(谢燮, 2013, 2016)。

铭杨岩体与区内含矿岩体在地质特征、岩相特征、岩石地球化学特征等方面均具有相似性。岩体岩石类型丰富, 从辉长岩相到橄榄辉长岩相, 再到橄榄岩相均有出现, 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。岩石中大量的橄榄石具有辉石反应边, Ce/Pb-Th/Zr、Ta/Yb-Th/Yb、Nb/Y-Th/Y、K₂O/P₂O₅-Nb-Ta 具有较好的相关性, 岩体 Ce/Pb、Nb/U 值更接近于地壳值, 大离子亲石元素具不同程度的富集, 显著亏损 Nb, 并具有弱的 Zr、Hf 负异常等特征, 均证明岩浆经历了一定程度的同化混染作用。地壳混染作用会导致岩浆中 SiO₂ 浓度的增加、温度的降低以及氧逸度的升高, 从而有利于硫的溶解, 其是形成 Cu-Ni-PGE 矿床的必要因素(Zhang et al., 2009; Naldrett, 2010)。

1:5 万水系沉积物测量显示, 铭杨岩体出露区域具有 Ni、Cu、Co、V 综合异常, 其中有 6 个单元元素异常, Ni 为主要成矿元素, 异常强度极大值为 238×10⁻⁶, 具 2 级浓度分带; Cu、Co、V3 元素均为低缓异常, Ni、Cu、Co、V4 种元素套合较好。异常区内发育有 3 个近等轴状 1:5 万航磁异常, 磁异常强度 100~200 nT, 磁异常中心对应有斑块状羟基蚀变异常, 具一、二、三级分带。1:1 万激电中梯测量和磁法测量显示岩体不仅具有磁场强度值高达 1200 nT 的明显磁异常, 而且磁异常与 1:1 万重力异常相套合, 地表铜镍矿化岩体表现出高极化率、中-低电阻率的异常组合特征; 激电测深剖面显示深部具有低阻高极化异常。通过地表槽探揭露和钻探深部验证初步圈定镍矿(化)体 12 条(图 10), Cu 平均品位为 0.16%, Ni 平均品位为 0.29%。该含矿岩体不仅地表已有强的铜镍矿化,

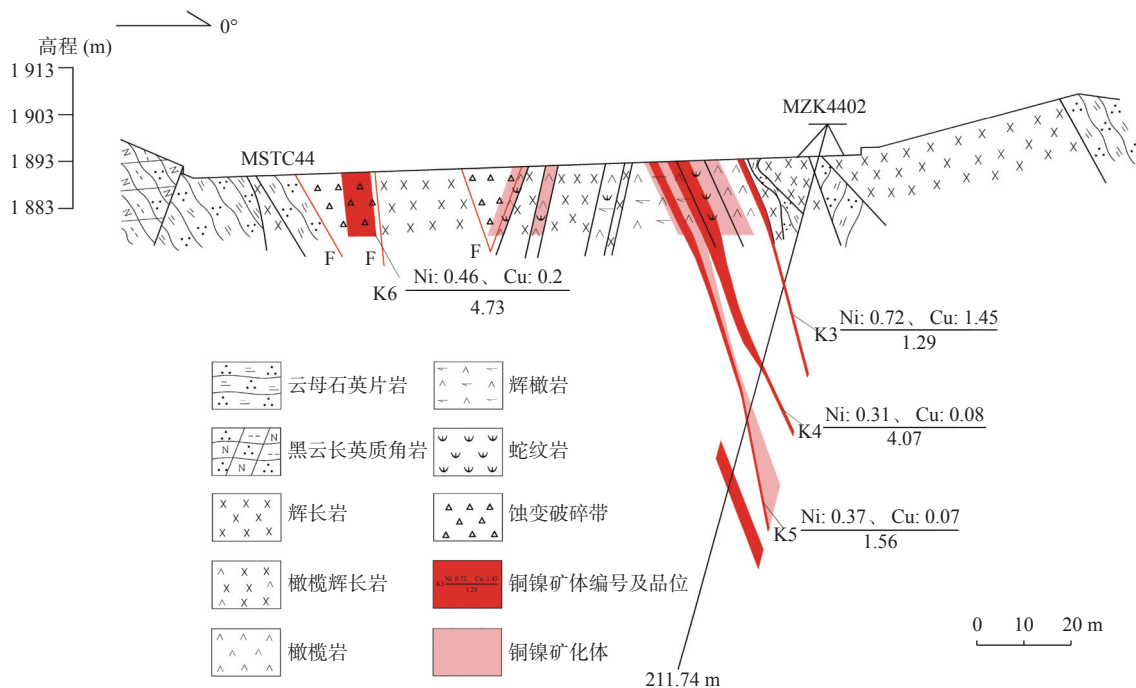


图10 铭杨44勘探线剖面简图

Fig. 10 Geological section map of 44 in Mingyang

而且浅深部磁异常、重力异常和激电异常特征十分明显,是个有可能形成工业矿床的靶区岩体。

甘肃北山地区的找矿实践证明,该地区是东天山铜镍成矿带向东寻求突破的重要铜镍找矿靶区,区域内已发现的铜镍矿化岩体,无论从构造地质背景,还是地、物、化、遥特征方面均显示出了较好的铜镍成矿条件,岩体整体剥蚀较浅,深部具有进一步找矿潜力。区域上沿红柳园-大奇山-天仓,广泛发育有基性-超基性岩,是甘肃北山南部地区一条重要的基性-超基性岩浆岩带(杨建国, 2012a)。中等强度航磁和地磁异常(200~1 000 nT)为寻找基性-超基性岩体提供了主要信息依据,岩体通常在地表已经强烈蚀变,常具有羟基或铁染遥感蚀变异常, Cr、Ni、Cu、Co 等高通区、综合地球化学异常或浓集区是含矿岩体可能存在的间接标志, 高极化、中低电阻率激电异常区反映出含矿岩体的地球物理场信息,通过“构造背景+杂岩体+蚀变+异常”的找矿思路可有效地指导区内岩浆型铜镍矿找矿工作。

7 结论

(1)铭杨镁铁-超镁铁岩体主要由辉橄岩、二辉橄岩、橄榄辉长岩、辉长岩等组成。岩体属于铁质基

性-超基性岩,具多期侵位、分异较好的特点。全岩成分以低碱、低钛为特征,岩浆演化过程中发生了橄榄石、辉石和斜长石的分离结晶作用,经历了一定程度的地壳混染。

(2)通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,首次获得铭杨岩体中橄榄辉长岩形成年龄为(452.9±2.4) Ma,辉长岩形成时间为(457.7±2.1) Ma。岩体地质、岩相学、岩石地球化学等特征,与区域含矿岩体具有较强的相似性,但成岩时代具有明显的差异性。该岩体具有较好的铜镍成矿潜力,其发现进一步证明甘肃北山地区具有较大的铜镍找矿空间。

参考文献(References):

- 白云来, 张汉成, 李卫红, 等. 论甘肃北山中部镍铜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.
- 何世平, 任秉琛, 姚文光, 等. 甘肃、内蒙古北山地区构造单元划分[J]. 西北地质, 2002, 35(4): 30-40.
- HE Shiping, REN Bingchen, YAO Wenguang, et al. Division of tectonic units in the North Mountain region of Inner Mongolia,

- Gansu[J]. *Northwestern Geology*, 2002, 35(4): 30–40.
- 何世平, 周会武, 姚文光, 等. 甘肃北山中泥盆统砾岩中放射虫的发现及其地质意义[J]. *西北地质*, 2004, 37(3): 24–28.
- HE Shiping, ZHOU Huiwu, YAO Wenguang, et al. Discovery and significance of Radiolaria from Middle Devonian conglomerate in Beishan area, Gansu[J]. *Northwestern Geology*, 2004, 37(3): 24–28.
- 姜常义, 程松林, 叶书锋, 等. 新疆北山地区中坡山北镁铁质岩与岩石成因[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 115–126.
- JIANG Changyi, CHENG Songlin, YE Shufeng, et al. Lithogeochemistry and petrogenesis of Zhongposhanbei mafic rock body at Beishan region, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1): 115–126.
- 李华芹, 陈富文, 梅玉萍, 等. 新疆坡北基性-超基性岩带 I 号岩体 Sm-Nd 和 SHRIMP U-Pb 同位素年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2006, 25(4): 463–469.
- LI Huaqin, CHEN Fuwen, MEI Yuping, et al. Isotopic ages of No. 1 intrusive body in Pobei mafic-ultramafic belt of Xinjiang and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(4): 463–469.
- 李华芹, 梅玉萍, 曲文俊, 等. 新疆坡北基性-超基性岩带 10 号岩体 SHRIMP U-Pb 和矿石 Re-Os 同位素定年及其意义[J]. *矿床地质*, 2009, 28(5): 633–642.
- LI Huaqin, MEI Yuping, QU Wenjun, et al. SHRIMP zircon U-Pb and Re-Os dating of No. 10 intrusive body and associated ores in Pobei mafic-ultramafic belt of Xinjiang and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(5): 633–642.
- 李文渊. 中国铜镍硫化物矿床成矿系列与地球化学[M]. 西安: 西安地图出版社, 1996, 1-228.
- LI Wenyuan. Metallogenic Series and Geochemistry of Nickel-Copper Sulfide Deposits in China[M]. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 1996, 1-228.
- 李向民, 余吉远, 王国强, 等. 甘肃北山红柳园地区泥盆系三个井组和墩墩山群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其意义[J]. *地质通报*, 2011, 30(10): 1501–1507.
- LI Xiangmin, YU Jiyuan, WANG Guoqiang, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Devonian Sangejing Formation and Dundunshan Group in Hongliuyuan, Beishan area, Gansu Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(10): 1501–1507.
- 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.
- 梁积伟, 冯振伟, 丁金刚, 等. 甘肃北山泥盆系三个井组的沉积特征及大地构造环境-构造体制转换时期的沉积响应[J]. *地质科学*, 2020, 55(4): 1012–1024.
- LIANG Jiwei, FENG Zhenwei, DING Jingang, et al. Research on sedimentary characteristics and tectonic setting of Devonian Sangejing Formation in Beishan, Gansu Province[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55(4): 1012–1024.
- 凌锦兰, 夏明哲, 郭娜欣, 等. 新疆北山地区罗东镁铁质-超镁铁质层状岩体岩石成因[J]. *地球化学*, 2011, 40(6): 499–515.
- LING Jinlan, XIA Mingzhe, GUO Naxin, et al. Petrogenesis of Luodong mafic-ultramafic layered intrusion, Beishan region, Xinjiang[J]. *Geochimica*, 2011, 40(6): 499–515.
- 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, SU Benxun, et al. The Tectonic Setting, Style, Basic Feature, Relative Erosion Degree, Ore-Bearing Evaluation Sign, Potential Analysis of Mineralization of Cu-Ni-Bearing Permian Mafic-ultramafic Complexes, Northern Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(4): 83–116.
- 苏本勋, 秦克章, 孙赫, 等. 新疆北山地区红石山镁铁-超镁铁岩体的岩石矿物学特征: 对同化混染和结晶分异过程的启示[J]. *岩石学报*, 2009, 25(4): 873–887.
- SU Benxun, QIN Kezhang, SUN He, et al. Petrological and mineralogical characteristics of Hongshishan mafic-ultramafic complex in Beishan area, Xinjiang: Implications for assimilation and fractional crystallization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(4): 873–887.
- 苏本勋, 秦克章, 孙赫, 等. 新疆北山地区旋窝岭镁铁-超镁铁岩体的年代学、岩石矿物学和地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2010, 26(11): 3283–3294.
- SU Benxun, QIN Kezhang, SUN He, et al. Geochronological, petrological, mineralogical and geochemical studies of the Xuanwoling mafic-ultramafic intrusion in Beishan area, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(11): 3283–3294.
- 孙赫, 秦克章, 李金祥, 等. 东天山图拉尔根铜镍钴硫化物矿床岩相、岩石地球化学特征及其形成的构造背景[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 606–617.
- SUN He, QIN Kezhang, LI Jinxiang, et al. Petrographic and geochemical characteristics of the Tulargen Cu-Ni-Co sulfide Deposit, East Tianshan, Xinjiang, and its tectonic setting[J]. *Geology in China*, 2006, 33(3): 606–617.
- 孙赫, 秦克章, 徐兴旺, 等. 东天山镁铁质-超镁铁质岩带岩石特征及铜镍成矿作用[J]. *矿床地质*, 2007, 26(1): 98–108.
- SUN He, QIN Kezhang, XU Xingwang, et al. Petrological characteristics and copper-nickel ore-forming processes of Early Permian mafic-ultramafic intrusion belts in East Tianshan[J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(1): 98–108.
- 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.

- TANG Zhongli, LI Wenyuan. Jinchuan Copper Nickel Sulfide(Platinum) Metallogenic Model and Comparison of Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995, 1-209.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 北山造山带古生代蛇绿混杂岩研究现状及进展[J]. 地质通报, 2021, 40(1): 71-81.
- WANG Guoqiang, LI Xiangmin, XU Xueyi, et al. Research status and progress of Paleozoic ophiolites in Beishan orogenic belt[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(1): 71-81.
- 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.
- 王梓桐, 王根厚, 张维杰, 等. 阿拉善地块南缘志留纪花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2022, 49(5): 586-600.
- WANG Zitong, WANG Genhou, ZHANG Weijie, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the Silurian granodiorite in the southern margin of Alxa Block, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2022, 49(5): 586-600.
- 徐学义, 何世平, 王洪亮, 等. 中国西北部地质概论—秦岭、祁连、天山地区[M]. 北京: 科学出版社, 2008, 1-347.
- XU Xueyi, HE Shiping, WANG Hongliang, et al. The Geological Survey of Northwest China: Qinling, Qilian and Tianshan Area[M]. Beijing: Science Publishing House, 2008, 1-347.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山岩浆作用[M]. 北京: 中国大地出版社, 2007, 1-350.
- XIA Linqi, XIA Zuchun, XU Xueyi, et al. Magmatism in Tianshan Mountains[M]. Beijing: China Land Press, 2007, 1-350.
- 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: 长安大学博士学位论文, 2009, 1-157.
- XIA Mingzhe. The mafic-ultramafic intrusions in the Huangshan Region Eastern Tianshan, Xinjiang: Petrogenesis and mineralization implication[D]. Xi'an: Chang'an University Ph. D. Dissertation, 2009, 1-157.
- 颀伟, 宋谢炎, 聂晓勇, 等. 新疆坡十铜镍硫化物含矿岩体岩浆源区特征及构造背景探讨[J]. 地学前缘, 2011, 18(3): 189-200.
- XIE Wei, SONG Xieyan, NIE Xiaoyong, et al. Features of the mantle source and tect setting of the Poshi Ni-Cu sulfide bearing intrusion, Xinjiang, China[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(3): 189-200.
- 夏昭德, 夏明哲, 王磊, 等. 塔里木板块东北部笔架山东基性-超基性岩体地球化学特征与岩石成因[J]. 地质科技情报, 2012, 31(2): 1-8.
- XIA Zhaode, XIA Mingzhe, WANG Yao, et al. Geochemical Characters and Petrogenesis of the Bijiaoshandong Basic-Ultrabasic Intrusion, NE Tarim Plate[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(2): 1-8.
- 谢燮, 杨建国, 王小红, 等. 甘肃北山大山头一带铜镍矿化基性-超基性岩地质、地球化学特征及成矿潜力[J]. 新疆地质, 2013, 31(4): 353-359.
- XIE Xie, YANG Jianguo, WANG Xiaohong, et al. The geology, geochemical characteristics and metallogenic potential of Dashantou Cu- Ni mineralized mafic- ultramafic rocks in Beishan, Gansu Province[J]. Xinjiang Geology, 2013, 31(4): 353-359.
- 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, 王小红, 等. 甘肃北山大山头-黑山一带基性-超基性岩成矿条件与找矿前景[J]. 西北地质, 2016, 49(1): 15-25.
- XIE Xie, YANG Jianguo, WANG Xiaohong, et al. Metallogenic Conditions and Prospecting Potential of Mafic-ultramafic Rocks along Dashantou-Heishan Area in Beishan, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2016, 49(1): 15-25.
- 熊万宇康, 赵梦琪, 于森, 等. 造山带洋陆转换过程与岩浆作用: 以东昆仑都兰地区古生代花岗岩为例[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 113-139.
- XIONG Wanyukang, ZHAO Mengqi, YU Miao, et al. Ocean-Continent Transition Process and Magmatism in Orogenic Belts: A Case Study of Paleozoic Granites in the Dulan Area of East Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 113-139.
- 杨合群, 李英, 李文明, 等. 北山成矿构造背景概论[J]. 西北地质, 2008, 41(1): 22-27.
- YANG Hequn, LI Ying, LI Wenming, et al. General discussion on metallogenic tectonic setting of Beishan Mountain, Northwestern China[J]. Northwestern Geology, 2008, 41(1): 22-27.
- 杨合群, 李英, 赵国斌, 等. 北山蛇绿岩特征及构造属性[J]. 西北地质, 2010, 43(1): 26-36.
- YANG Hequn, LI Ying, ZHAO Guobin, et al. Character and Structural Attribute of the Beishan Ophiolite[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(1): 26-36.
- 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 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 2012a, 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*, 2012a, 31(2-3): 448-454.
- 杨建国, 谢春林, 王小红, 等. 甘肃北山地区基本构造格局和成矿系列特征[J]. *地质通报*, 2012b, 31(2-3): 422-438.
- YANG Jianguo, XIE Chunlin, WAN Xiaohong, et al. Basic tectonic framework and features of metallogenic series in Beishan area, Gansu Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012b, 31(2-3): 422-438.
- 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*, 2016, 4(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, Gansu Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 4(1): 98-108.
- 余吉远, 王国强, 李向民, 等. 北山地区花牛山群的重新厘定-来自火山岩地球化学证据[J]. *新疆地质*, 2015, 33(4): 537-543.
- YU Ji yuan, WANG Guoqiang, LI Xiangmin, et al. The Redefinition of Huaniushan Group in Beishan area: Geochemical Evidence from Volcanic Rocks[J]. *Xinjiang Geology*, 2015, 33(4): 537-543.
- 左国朝, 李绍雄. 塔里木盆地东北缘早古生代构造格局及演化[J]. *中国地质*, 2011, 38(4): 945-960.
- ZUO Guochao, LI Shaoxiong. Early Paleozoic framework and evolution in the northeast margin of Tarim Basin[J]. *Geology in China*, 2011, 38(4): 945-960.
- Ao S J, Xiao W J, Han C M, et al. Geochronology and geochemistry of early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan area, Xinjiang, NW China: implications for late Paleozoic tectonic evolution of the southern altaids[J]. *Gondwana Research*, 2010, 18: 466-478.
- Hofmann W. Chemical differentiation of the earth: the relationship between mantle, continental crust and oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90: 297-314.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257: 34-43.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, et al. Zircon M257-A homogeneous natural reference material for the Ion Microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2008, 32(3): 247-265.
- Naldrett A. J. Secular Variation of Magmatic Sulfide Deposits and Their Source Magmas[J]. *Economic Geology*, 2010, 105(3): 669-688.
- 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.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[M]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- Song X Y, Li X R. Geochemistry of the Kalatongke Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China: implications for the formation of magmatic sulfide mineralization in a postcollisional environment[J]. *Mineralium Deposita*, 2009, 44(3): 303-327.
- Song X Y, Xie W, Deng Y F, et al. Slab break-off and the formation of Permian mafic-ultramafic intrusions in southern margin of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, NW China[J]. *Lithos*, 2011, 127(1/2): 128-143.
- 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.
- 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, 209-230.
- Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, Saunders A D, et al. Petrogenetic modeling of three mafic-ultramafic layered intrusions in the Emeishan large igneous province, SW China, based on isotopic and bulk chemical constraints[J]. *Lithos*, 2009, 113(3-4): 369-392.