

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2019.04.001

基性-超基性岩铜镍矿与铬铁矿 含矿性判别研究

刘嘉¹, 蔡鹏捷²

(1. 湖北省地质调查院, 武汉 430030;

2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075)

摘要: 岩石与矿物地球化学数据常用于判别岩石成因、构造环境等,事实上它们也可以用于判别岩石成矿专属性,从而更好地指导找矿工作。通过对含铜镍矿的基性-超基性岩与含铬铁矿的基性-超基性岩全岩主量、铂族元素和铬铁矿尖晶石地球化学特征进行综合对比研究结果显示:1)铜镍矿的 m/f 值主要集中在 $1.5 \sim 8.5$, 铬铁矿主要集中在 $6.5 \sim 12.5$, 有一定重叠, 因此通过 m/f 值确定是否成矿具有不确定因素; 利用全岩主量元素的二元图解进行判别也存在重叠区域, 不利于成矿专属性的判别。2)铜镍矿基性-超基性岩全岩具有较高的 $w(\text{PPGE})/w(\text{IPGE})$ 值 ($0.06 \sim 343.75$, 平均 16), $w(\text{Pd})/w(\text{Ir}) > 1$; 铂族元素具有左倾的原始地幔配分模式; 铬铁矿尖晶石高 $w(\text{TiO}_2)$ 、 $\text{Fe}^\#$ 值, $\text{Cr}^\#$ 、 $\text{Mg}^\#$ 值变化范围较大。3)铬铁矿基性-超基性岩全岩具有低的 $w(\text{PPGE})/w(\text{IPGE})$ 值 ($0.0004 \sim 20.34$, 平均 0.55), $w(\text{Pd})/w(\text{Ir}) < 1$, 铂族元素具有右倾的原始地幔配分模式; 铬铁矿尖晶石低 $w(\text{TiO}_2)$ 、 $\text{Fe}^\#$ 、 $\text{Mg}^\#$ 值, 高 $\text{Cr}^\#$ 值。因此, 利用基性-超基性岩的铂族元素与铬铁矿地球化学特征值能有效指示成矿专属性, 可成为基性-超基性岩铬铁矿与铜镍矿的勘查工具。

关键词: 基性-超基性岩; 铜镍矿; 铬铁矿; PEG; 铬铁矿尖晶石

中图分类号: P588.124; P622.3 **文献标识码:** A

0 引言

利用物探、化探以及遥感的方法对于大比例尺找矿靶区的圈定已卓有成效^[1-2]。但基于小比例尺范围, 甚至单一岩体, 如何有效判别岩体的成矿类型, 一直以来是研究的热点与难点^[3-7]。利用全岩主微量和单矿物判别成矿类型, 如花岗岩全岩主微量判别成矿^[8-10], 磁铁矿判别矿床类型^[11], 磷灰石判别矿床类型^[12], 黄铁矿判别金属矿床^[13]等都取得了较大的进展。但对于基性-超基性岩相关的成矿判别研究却相对较少。

基性-超基性岩主要赋存有铬铁矿和铜镍硫化物矿床, 同时伴生有铂族、钒钛磁铁矿、金矿和菱镁矿等^[14]。如何快速识别基性-超基性岩的含矿性对于指导找矿是十分重要的。基性-超基性岩的镁铁比值 (m/f) 一直被用作评价成矿潜力的重要指标^[15-17]。实际上对于基性-超基性岩成矿专属性的控制因素还包括: 大地构造背景, 部分熔融程度, 矿体就位特征, 原岩成分等多个方面^[18]。随着全球基性-超基性岩的研究深入, 其地球化学测试数据越来越多, 如何从海量数据提取有用信息是十分关键的。本文在收集前人大量基性-超基性岩成矿有关测试数据基础上, 对赋含铬铁矿和铜镍硫化物矿的基性-超基性岩的全岩主量、铂族及铬铁矿尖晶石地球化

收稿日期: 2019-06-05; **责任编辑:** 王传泰

基金项目: 湖北省地勘基金项目“湖北省麻城市西张店地区金多金属矿调查评价”(鄂采计[2018]—09697号)资助。

作者简介: 刘嘉(1989—), 男, 工程师, 硕士, 从事矿产勘查工作。通信地址: 湖北省武汉市汉口古田五路9号, 湖北省地质调查院; 邮政编码: 430030; E-mail: liujia89212@126.com

通信作者: 蔡鹏捷(1988—), 男, 工程师, 博士, 主要从事造山带基性-超基性岩相关岩石及矿床研究工作。通信地址: 广东省广州市越秀区环市东路477号, 广州海洋地质调查局; 邮政编码: 510075; E-mail: caipengjie@cug.edu.cn

学特征进行分析总结,建立相关判别图解,以期为基性-超基性岩的找矿工作提供快速判别的依据。

1 基性-超基性岩的镁铁比值特征

利用镁铁比值对基性-超基性岩进行分类,最早是由 H П 索波列夫(1958)^[19]提出;其计算镁铁比值的公式为: $M/F = [n(\text{MgO}) + n(\text{NiO})] / [n(\text{FeO}) + 2n(\text{Fe}_2\text{O}_3) + n(\text{MnO})]$, n 为氧化物分子数。但该公式具有一定的局限性,计算时必须将铬尖晶石

的 Mg、Fe 含量剔除,因为少量的铬尖晶石具有大量的 MgO、FeO、Fe₂O₃ 类质同象,由于它们的混入会引起较大误差。因此,吴利仁(1963)^[15]针对索波列夫提出的 M/F 公式,进行了一系列的研究和修正,提出了新的镁铁比值: $m/f = [n(\text{Mg}^{2+}) + n(\text{Ni}^{2+})] / [n(\text{Fe}^{2+}) + n(\text{Fe}^{3+}) + n(\text{Mn}^{2+})]$, n 为原子比数。

吴利仁(1963)^[15]根据 m/f 值得不同,将基性-超基性岩分为镁质超基性岩($m/f > 6.5$),铁质超基性岩($m/f = 2 - 6.5$),富铁质超基性岩($m/f = 0.5 - 2$),铁质基性岩($m/f = 0.5 - 2$)和富铁质基性岩(m/f

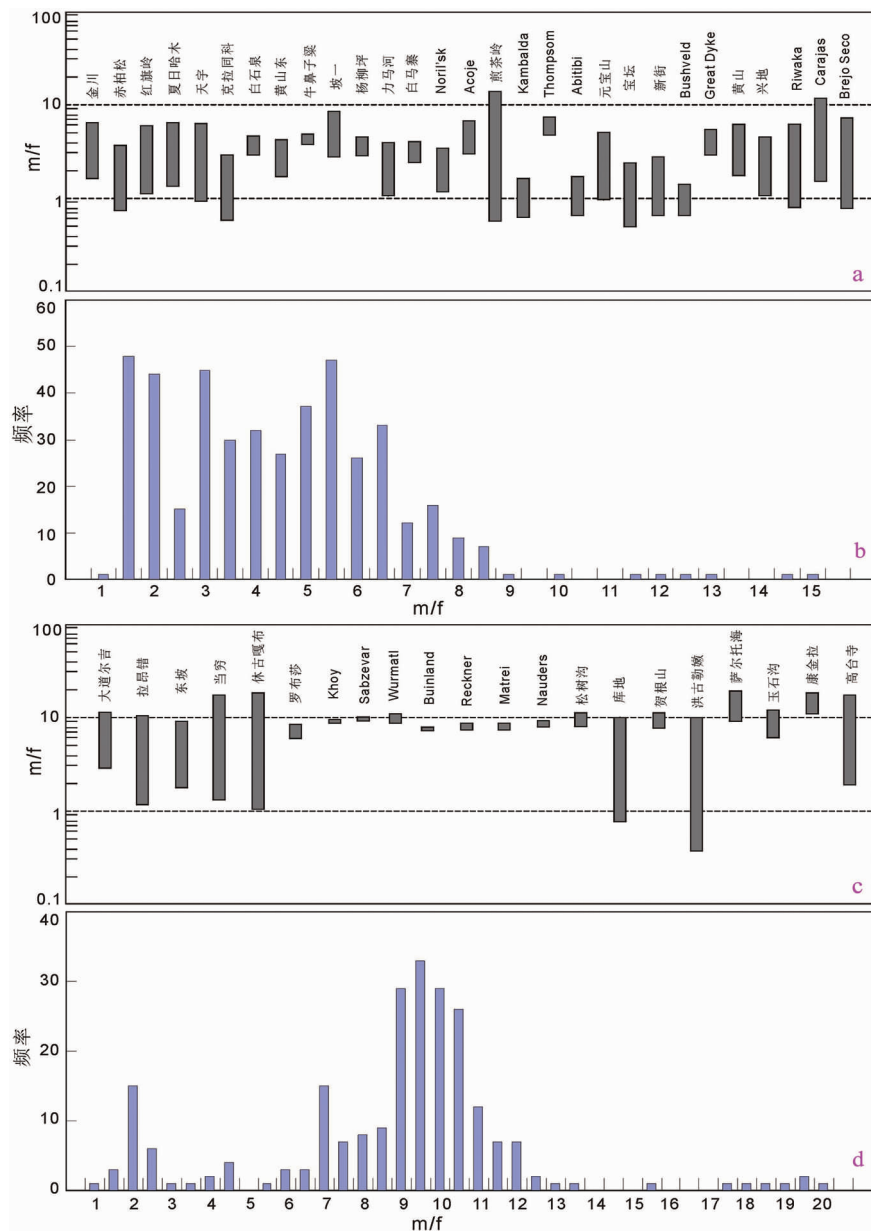


图1 铜镍矿和铬铁矿与 m/f 值相关统计

Fig. 1 Statistics of correlation of m/f value to Cu-Ni ore and Cr ore

=0—0.5)五类。同时结合赋铜镍矿岩体的 m/f 特征,吴利仁(1963)^[15]认为铁质超基性岩中 $m/f=4\sim6$ 有利于铜镍矿的成矿。孙鼎等(1985)^[20]结合我国祁连山一带与基性-超基性有关的矿床,对吴利仁(1963)^[15]的分类进行了成矿专属性的划分,认为铜镍矿主要形成于铁质超基性岩,同时指出在成分上具有 MgO 含量较低, Fe_2O_3 、 FeO 含量偏高的特征。代俊峰等(2016)^[16]结合前人研究和国内外典型岩浆型铜镍矿床,认为镁铁比值进行岩石分类只能利用在超基性岩,同时还要考虑岩石类型、蚀变及构造等影响;含矿岩石的 m/f 值大于不含矿岩石,矿石的 m/f 值大于围岩;蚀变和混染作用会使岩石具有很高的 m/f 值,而与超基性岩有关的铜镍矿床的 m/f 值在 3.70~7.83 之间。

实际上,本文对部分国内外有关基性-超基性岩铜镍矿和铬铁矿的 m/f 值统计结果表明:基性-超基性岩铜镍矿的岩石 m/f 值的范围从 0.4→14.01 (图 1a),主要集中在 1.5~8.5 之间(图 1b);基性-超基性岩铬铁矿岩石的 m/f 值范围为 0.37~19(图

1c),主要集中在 6.5—12.5 之间(图 1d)。两者存在一定叠合,因此通过 m/f 值用于判别成矿需要更进一步结合其它判别指标。

2 数据成果

本文收集到国内外铜镍矿基性-超基性岩与铬铁矿基性-超基性岩的全岩主量元素数据 672 个,全岩铂族元素数据 322 个,铬铁矿尖晶石数据 621 个。有关数据分别见表 1、表 2、表 3 所述。

3 讨论

3.1 全岩主量元素特征

通过收集的赋存铜镍矿、铬铁矿基性-超基性岩体主量元素数据,制作 MgO 与其它主量元素相关的 Harker 图(图 2),可见含铬铁矿的基性-超基性

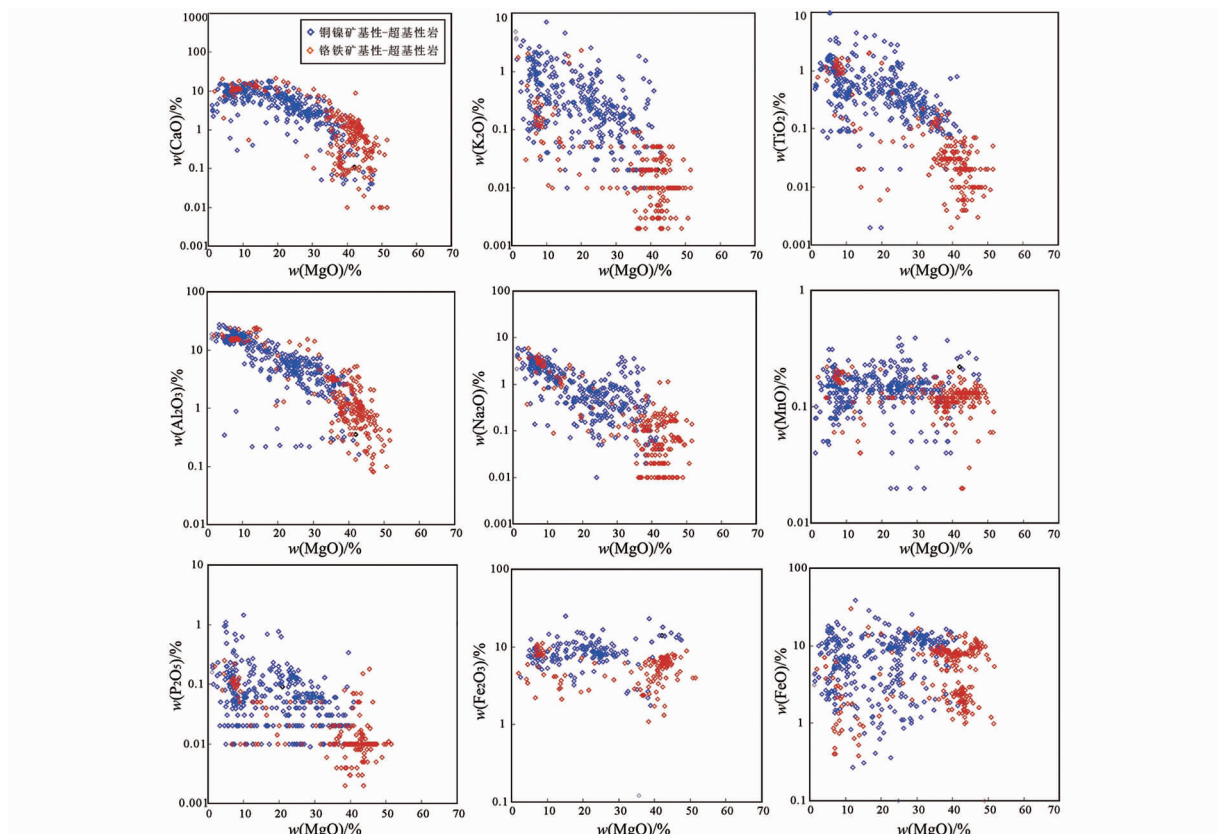


图2 铬铁矿基性-超基性岩与铜镍矿基性-超基性岩的 MgO 与其它主量元素关系图

Fig. 2 MgO vs other major element (CaO , K_2O , TiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , MnO , P_2O_5 , Fe_2O_3 and FeO) diagram of the Chromium ore-hosted and Cu-Ni ore-hosted basic-ultrabasic rocks

表1 铬铁矿基性-超基性岩与铜镍矿基性-超基性岩主量元素
Table 1 The major elements of the Chromium ore-hosted and Cu-Ni ore-hosted basic-ultrabasic rocks

矿床类型	矿床名称	样数	SiO ₂	CaO	K ₂ O	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	FeO, TFeO	Fe ₂ O ₃ , TFe ₂ O ₃	m/f值	资料来源
铬铁矿	新疆洪古勒	23	40.94~61.52	0.21~20.73	0.02~2.03	0.02~1.14	0.87~24.12	1.93~46.36	0.06~5.87	0.04~0.22	0.01~0.25	2.108.38	0.38~7.56	0.37~10.06	文献[21]
	甘肃大滩	6	34.45~49.87	0.27~14.6	0.01~0.18	0.03~0.12	0.17~14.6	11.8~41	0.03~0.83	0.07~0.21	0.01~0.02	1.08~7.2	1.8~6.23	3.14~10.66	文献[22]
	拉昂措	42	38.92~55.03	0.29~21.39	0.001~0.26	0.001~1.63	0.45~15.34	6.87~47.3	0~3.77	0.11~0.21	0.002~0.13	2.62~11.63	0.4~4.69	1.14~10.63	文献[23]
	东坡	15	38.88~47.32	0.1~7.33	0.002~0.016	0.002~0.055	0.18~3.61	33.4~45.07	0.01~0.17	0.08~0.14	0.005~0.018	2.45~8.05	0.99~6.57	8.09~9.43	文献[23]
	当努	13	40.36~49.86	0.23~14.81	0.007~1.49	0.1~16.14	7.01~50.67	7.01~50.67	0.01~3.24	0.06~0.2	0.06~0.18	3.99~9.59	0.1~2.91	1.32~17.8	文献[23]
	休古嘎布	9	37.62~49.15	0.07~11.77	0.002~0.29	0.024~1.17	0.41~16.12	6.56~51.45	0.01~3.78	0.06~0.18	0.01~0.11	2.36~9.02	0.99~8.67	1.03~18.7	文献[23]
	罗布沙	18	38.08~42.98	0.1~1.55	0.003~0.01	0.008~0.07	0.21~4.51	38.8~47.06	0.01~0.04	0.1~0.17	0.008~0.014	3.54~7.78	1.82~8.11	5.97~8.64	文献[24]
	Khoy	3	41.3~42.5	1.56~1.91	0.03	0.03~0.04	1.69~2.09	40.9~41.6	0.19~0.24	0.13	0.01		8.24~8.9	9.19~9.75	文献[25]
	Sabzevar	3	39.8~42	0.65~2.4	0.01~0.03	0.02~0.07	0.81~2.5	38.5~44.7	0.15~1.13	0.10~0.12	0.01		8.28~8.75	8.7~10.08	文献[26]
	Wurmali	2	41.1~41.18	0~0.91	0	0.02~0.11	1.19~3.23	35.57~38.34	0	0.07~0.11	0.01		6.86~8.02	8.7~11.05	文献[27]
	Bainland	2	38.48~38.95	0.23~0.37	0	0.15~0.21	2.94~3.49	35.28~35.65	0	0.01	0.01		8.82~9.66	7.29~7.89	文献[27]
	Reckner	3	38.5~40.4	0.41~1.74	0.01	0.11~0.17	0.61~3.02	34.13~37	0.04~0.06	0.09~0.12	0.01~0.02		7.63~9.87	7.39~8.8	文献[27]
	Matri	5	39.16~42.06	0.05~5.27	0	0.1~0.22	3.06~4.64	31.75~35.83	0	0.07~0.13	0.01		7.78~9.03	7.44~8.84	文献[27]
	Nauders	3	40.44~41.45	2.09~2.86	0.09	0.1~0.14	3.08~3.49	35.05~36.77	0.13~0.18	0.11~0.15	0.02		7.62~8.59	8.00~9.48	文献[27]
	松树沟	10	38.07~49.96	0.05~3.29	0.01~0.05	0	0.08~0.56	35.29~47.08	0.16~0.32	0.11~0.14	0.01		6.15~11.35	8.04~11.24	文献[28]
	西昆仑库地	15	2.76~42.9	0.1~0.64	0.01	0.1~0.39	0.29~20.02	11.6~48	0.05~0.09	0.11~0.22	0		8.42~30.15	0.76~10.44	文献[29]
	内蒙贺根山	24	34.6~39.36	0.07~0.34	0.02~0.05	0.03~0.04	0.45~1.77	37.49~41.4	0.1~0.56	0.09~0.15	0		7.19~8.95	8.29~11.27	文献[30]
	玉石沟	8	29.93~46.63	0.01~0.29	0.03~0.29	0.01	0.01~0.02	41.91~45.9	0.01	0.03~0.18	0.01		7.3~14.23	6.05~12.21	文献[31]
	康金拉	12	39.17~43.77	0.01~1.52	0.01~0.03	0.02~0.03	0.18~1.21	39.35~51.57	0.05~0.17	0.09~0.13	0.01		5.43~7.87	10.68~18.64	文献[32]
	高台寺	9	32.11~46.39	0.1~16.25	0.01~2.29	0.02~1.99	0.24~13.01	16.36~44.88	0~2.55	0.09~0.13	0.01~0.04		4.81~17.27	1.89~17.22	文献[33]
	萨东托海	9	30~41.75	0.23~0.73	0.05	0.01~0.03	0.75~4.18	38.26~42.91	0.05	0.02~0.12	0.03~0.08	1.31~6.22	1.35~4.91	9.09~19.29	文献[34]
铜镍矿	金川	13	31.17~55.51	0.11~18.12	0.02~0.18	0.09~0.78	0.16~4.28	17.42~42.82	0.04~0.596	0.12~0.26	0.051~0.335	3.23~14.06	1.01~25.13	1.62~6.47	文献[35]
	赤柏松	7	39.83~49.79	1.72~10.35	0.08~0.69	0.29~1.1	1.27~16.54	8.24~28.7	0.13~2.39	0.14~0.19	0.04~0.11		10.24~14.95	1.58~3.67	文献[36]
	红旗岭	27	39.22~55.32	1.57~7.73	0.08~2.14	0.24~1.91	3.52~13.91	6.43~32.03	0.38~5.31	0.01~0.15	0.04~0.16	4.81~11.65	6.77~13.89	1.12~5.96	文献[37]
	夏日哈木	64	35.7~52.58	0.3~15.35	0.03~0.97	0.08~0.78	0.65~23.57	5.8~38.82	0.01~3.8	0.08~0.2	0.01~0.13		4.12~15.96	1.36~6.39	文献[38]
	天宇	8	35.9~47.7	3.12~6.57	0.06~1.97	0.41~0.86	6.27~17.1	11.4~24.1	0.01~2.12	0.1~0.18	0.11~0.23	7.34~15.4	11.3~22.9	0.92~2.49	文献[39]
	克拉同科	30	38.65~65.07	2.25~11.14	0.45~3.7	0.44~1.84	7.45~18.69	1.34~17.4	1.67~5.83	0.08~0.25	0.09~1.09	4.06~8.89	1.37~20.27	0.58~2.91	文献[40~41]
	白石泉	11	38.45~49.3	2.42~10.52	0.06~1.41	0.16~0.46	4.18~18.07	9.95~31.05	0.24~2.93	0.1~0.16	0.05~0.07		6.5~14.48	2.89~4.64	文献[42]
	黄山东	17	40.6~50.6	2.4~13.7	0.094~0.292	0.205~2.95	6.65~24.9	5.06~29.6	0.659~3.49	0.047~0.152	0.039~0.068		3.26~14.3	1.7~4.22	文献[43]
	牛鼻子梁	8	35.17~44.47	2.83~7.01	0.25~0.81	0.34~0.77	4.84~12.33	20.09~31.79	0.33~1.74	0.13~0.17	0.07~0.17		10.46~13.62	3.79~4.73	文献[44]
	坡一	27	34.03~48.79	0.61~15.05	0.02~0.59	0.05~0.26	1.27~27.66	3.37~37.5	0.19~3.74	0.05~0.16	0.01~0.04		2.38~11.8	1.28~9.81	文献[45]
	杨柳坪	10	35.92~44.74	2.33~7.73	0.02~1.35	0.54~1.04	3.67~8.95	16.55~29.42	0.05~1.22	0.09~0.39	0.009~0.147	6.39~9.42	1.32~9.18	2.87~4.55	文献[46]
	白马河	15	35.58~50.61	3.52~13.04	0.66~2.13	1.04~3.57	5.18~16.62	7.01~25.74	0.08~2.26	0.12~0.16	0.1~0.16	7.27~9.57	1.65~9.3	1.04~3.93	文献[47]
	力马素	6	40.75~49.22	1.58~5.96	0.18~2.13	0.27~0.65	6.91~13.47	15.09~25.43	0.12~1.22	0.12~0.19	0.01~0.17	7.9~10.37	0.31~3.69	2.44~4.04	文献[48]
	诺里尔	16	43.75~53.86	7.74~11.61	0.01~1.06	0.42~1.01	6.9~15.86	6.42~17.28	0.33~2.35	0.15~0.184	0.06~0.14	6.93~11.55		1.17~3.45	文献[49]
	Acoje	7	37.68~40.28	0.03~0.08	0	0	0	38.47~47.46	0	0.17~0.37	0	12.33~22.84		2.98~6.83	文献[50]
	煎茶岭	18	21.27~48.91	0.04~11.5	0.01~6.99	0.01~0.18	0.22~17.03	10.09~38.8	0.03~0.51	0.05~0.24	0.01~1.46	2.52~14.9	2.02~38.27	1.04~14.02	文献[51]
	Kambalda	7	40.89~50.67	9.47~12.15	0.07~0.31	0.67~1.47	12.65~15.63	4.73~9.61	1.34~2.64	0.18~0.25	0.05~0.14		9.38~15.91	0.62~1.35	文献[52]
	Thompson	11	39.04~54.53	0.2~2.79	0.05~2.53	0.02~0.22	0.77~4.32	22.7~41	0.05~0.33	0.05~0.14	0.01~0.05		9.26~16.41	4.74~7.40	文献[53]
	Ahtitibi	12	43.51~65.22	4.19~15.67	0~4.74	0.48~1.72	13.25~23.99	1.19~7.9	0.14~4.62	0.04~0.31	0.05~0.37		3.12~16.64	0.64~1.68	文献[54]
	元宝山	5	43.27~53.63	3.52~11.81	0.01~1.77	0.27~1.12	4~14.42	6.07~35.51	0.1~3.61	0.15~0.31	0.04~0.09	5.9~10.04	2.59~7.24	0.94~5.09	文献[55]

(接上表)

	4	51.61~64.26	2.4~7.57	0.46~2.72	0.53~1.34	12.93~15.45	2.5~10.3	2.19~3.58	0.11~0.17	0.09~0.14	7.1~11.86	0.49~2.39	文献[55]
	11	35.48~48.69	6.69~16.62	0.1~0.62	1.59~9.81	3.68~13.78	10.46~24.47	0.15~1.54	0.15~0.25	0.03~0.27	7.89~14.42	0.74~10.5	文献[56]
	6	41.41~40.5	4.78~10.46	0.33~0.61	0.24~0.39	7~18.51	7.3~21.05	0.5~3.59	0.11~0.2	0.035~0.088	6.56~9.92	9.89~19.51	文献[57]
	16	48.94~55.12	2.84~17.59	0	0.09~1.06	2.09~19.82	5.43~27.82	0.14~3.07	0.11~0.25	0~0.03	3.98~14.68	0.73~5.46	文献[58]
	19	39~51.8	0.58~11.48	0.016~0.86	0.15~0.96	2.56~16.84	7.13~39.15	0.15~3.26	0.11~0.18	0.03~0.14	1.47~12.4	1.75~5.96	文献[59]
	5	35.66~41.77	1.86~6.85	0.16~0.26	0.24~0.59	2.3106.22	15.05~34.76	0.39~9.93	0.16~0.21	0	9.4~24.65	1.11~2.97	文献[60]
	19	38.3~61.9	1.5~15	0~3.9	0.4~3.0	1.6~18.8	3.1~29	0.2~4.3	0.1~0.2	0.1~1.3	3.8~16.8	0.67~2.98	文献[61]
	12	38.84~54.1	0.14~9.74	0.03~1.43	0.04~0.29	1.52~21.2	6.25~38.1	0.02~1.17	0.03~0.25	0.01~0.02	4.2~12.99	1.5~7.16	文献[62]
	26	34.74~49.02	0.04~16.46	0.01~0.02	0.01~5.84	0.72~27.07	1.2~37.29	0.01~3.45	0.05~0.26	0.01~0.12	3.11~19.43	0.75~7.18	文献[63]

表 2 铬铁矿基性-超基性岩与铜镍矿基性-超基性岩铂族元素

Table 2 PGE of the Chromium ore-hosted and Cu-Ni ore-hosted basic-ultrabasic rocks													
矿床类型	矿床名	样数	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	ΣPGE	IPGE/PPGE	Pd/Ir	Pt/Pt*	资料来源
铜镍矿	Dehsheikh	10	8~79	11~69	35~161	4~13	1~5	2~5	62~306	5.72~17.66	0.03~0.31	0.06~0.24	文献[64]
	Zambales	5	15.18~60.3	5.2~9.44	0.15~161	0.35~9	—	0.02~1.1	61.37~68.75	60.9~342.75	0.003~0.12	—	文献[65]
	Troodos	4	15.52~28.11	11.41~24.31	19.26083.62	—	0.03~9.07	11.13~76.8	76.9~158.91	0.78~5.89	0.96~6.73	—	文献[66]
	Elekdağ	31	11~279	16~290	37~863	2~9	2~10	2~10	82~1466	5.14~42.12	0.01~0.28	0.07~0.44	文献[67]
	达机翁	16	3.09~88.7	3.04~70.8	5.13~134	1.01~11.7	1.3~7.19	1.3~9.09	23.68~271.63	0.76~17.35	0.03~2.9	0.09~0.79	文献[68]
	小松山	9	1~205	0.5~36	1~350	0.5~15	2~116	0~149	8~838	0.45~54.44	0.3~7.45	0.23~2.23	文献[69]
	雅鲁藏布江西段	19	0.69~6.48	0.31~4.77	2.95~10.1	0.2~2.04	0.66~17.2	0.35~54.3	19.04~49.92	0.05~11.29	0.08~171.39	0.69~1.27	文献[23]
	萨尔托海	13	1.28~57.4	0.69~11.3	2.59~19.4	0.33~5.58	1.31~72.5	0.69~140	8.74~256.41	0.17~20.48	0.10~23.60	0.15~1.9	文献[34]
	金川	33	0.6~150	0.5~67.7	1.7~138	0.2~28.2	3.9~686.6	1.3~320	9.3~996.6	0.01~0.63	1.25~77.73	0.07~4.36	文献[35,70]
	牛鼻子梁	11	—	0.03~0.21	0.04~0.76	0.01~0.66	0.37~2.3	0.16~5.73	0.65~8.66	0.04~0.29	2.28~36.22	0.17~2.95	文献[44]
铬铁矿	夏日哈木	38	0.26~2.91	0.1~2.02	0.2~3.13	0.04~2.09	0.34~282	0.68~57.2	2.65~348.21	0.02~0.66	5.04~43.33	0.05~8.24	文献[71]
	黑山	29	0.09~5.20	0.05~2.4	0.08~4.91	0.04~1.99	0.85~28.34	0.63~29.35	1.86~173.9	0.07~0.46	5.69~42.82	0.47~2.76	文献[72]
	力马河	12	0.37~7.97	0.16~2.93	0.25~11.1	0.07~1.76	0.74~121	0.83~42.7	3.48~181.07	0.09~2.91	1.38~14.57	0.21~9.42	文献[73]
	Nebo~Babel	26	—	0.05~95.54	0~237.61	0.08~122.25	0.89~242.04	1.26~350.28	2.28~673.75	0.01~1.12	1.56~166	0.05~3.00	文献[74]
	煎茶岭	15	2.2~4.4	0.6~3.2	1~9.22	0.2~0.78	1~38.69	1~17.52	5.2~65.05	0.49~1.56	3.5~7.78	0.14~4.89	文献[51]
	Thompson	27	9~255	1~132	9~365	4~124	34~538	52~2176	150~2685	0.002~0.93	3.67~15.90	0.29~1.48	文献[53]
	Great Dyke	15	0.07~9.5	0.03~8.5	0.12~171	0.29~195	0.65~2571	0.47~1546	1.57~1908.5	0.02~0.42	2.50~88.26	0.25~5.62	文献[58]
	McCreehy	9	0.17~165	0.13~347	0.3~144	1.64~274	55~2012	15.9~2192	36.41~3709.8	0.0004~0.49	1.96~948.5	0.0703.89	文献[75]

表 3 铬铁矿基性-超基性岩与铜镍矿基性-超基性岩铬尖晶石成分

Table 3 Composition of chromium spinel of the Chromium ore-hosted and Cu-Ni ore-hosted basic-ultrabasic rocks													
类型	矿床名	样数	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	NiO	Cr [#]	Mg [#]	Fe [#]
铬铁矿	罗布莎	63	0~0.54	0~0.29	4.22~45	21~65	8.83~23.11	0.47~13.46	6.21~18.2	0~0.39	32.8~91.2	23.2~76.6	2.87~35.7
	Dehsheikh	66	0~0.53	0.01~0.37	8.86~53.54	13.74~59.45	11.38~25.93	0.26~23.23	5.07~18.13	0.02~0.4	15.10~79.49	25.22~71.87	1.87~47.13
	Miaoan	31	0~0.53	0~0.84	0~18.93	3.71~53.75	5.09~64.1	18.8~30.51	0.35~10.15	0~0.52	60.12~100	5.76~65.08	3.26~84.59
	Sartobay	38	0~0.06	0.03~0.44	10.29~33	34.3~59.45	1.65~19.08	2.31~17.1	9.86~15.8	0~0.42	41.3~79.49	47.99~72.20	14.97~30.73
	Dalabute	13	—	0.03~0.44	21~31.1	34.3~46.2	1.65~2.72	11.66~17.1	11.9~15.8	0.1~0.42	41.3~59.6	56.2~70.7	8.44~24.4
	Pakistan	28	0~0.4	0~0.38	1.54~52.47	16.13~64.29	0~8.19	8.86~26.77	5.15~19.38	0~0.25	17.1~92.37	16.13~76.8	0~22.222
	夏日哈木	35	0~0.4	0~0.32	18.3~47.93	19.94~44.56	0.05~4.84	17.04~27.67	4.43~14.8	0~0.18	21.81~82.02	22.02~60.70	0.29~15.96
	Hongshishan	127	0~4.05	0.50~3.35	1.51~27.94	30.15~46.42	2.04~29.06	17.47~35.64	0.89~13.21	0.02~0.17	46.17~93.30	3.82~56.92	7.07~42.47
	Kapalagulu	153	0~0.29	0.19~0.40	9.37~19.38	39.04~46.28	8.01~14.03	19.41~27.26	4.5~10.42	0.04~0.24	58.6~76.6	22.7~48.9	9.7~18.6
	Jinbaoshan	30	0~0.05	1.67~5.59	9.4~16.77	20.53~42.64	11.38~27.16	17.37~32.55	1.34~12.96	0.1~0.33	53.63~69.21	4.09~50.41	29.17~48.59
铜镍矿	周庵	37	0~0.09	0.67~4.25	0.2~13.32	24.25~41.48	11.15~41.53	27.87~35.85	0.39~3.59	0.05~0.44	64.0~97.0	3~21.0	23.78~54.15

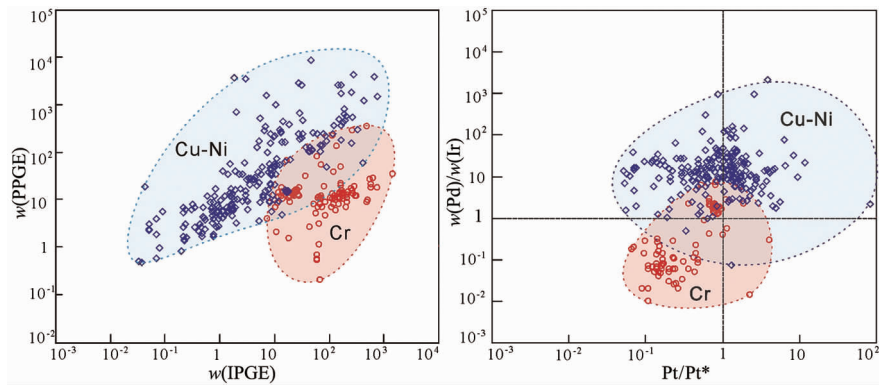


图3 铬铁矿基性-超基性岩、铜镍矿基性-超基性岩 $w(\text{PPGE})-w(\text{IPGE})$ 、 $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})-\text{Pt}/\text{Pt}^*$ 图解

Fig. 3 $w(\text{PPGE})-w(\text{IPGE})$, $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})-\text{Pt}/\text{Pt}^*$ Plot of the Chromium ore-hosted and Cu-Ni ore-hosted basic-ultrabasic rocks

岩具有高 MgO 、低 CaO 、 K_2O 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 P_2O_5 特征,而含铜镍矿的基性-超基性岩则具有低 MgO 、高 CaO 、 K_2O 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 P_2O_5 特征。一般认为基性-超基性岩的铜镍矿床是幔源岩浆经历了复杂的演化达到 S 饱和同时发生硫化物熔离而形成的^[85]。硫饱和机制对于铜镍矿床的成因尤为重要。影响硫饱和机制的主要有岩浆的结晶分异、温压条件、外来物质的加入、岩浆混合以及地壳硫的加入等因素^[85-86]。因此总体上可以看出,这些元素的变化是与成矿过程有关。但是值得注意的是,利用主量元素划分基性-超基性岩的铜镍矿与铬铁矿成矿性,仍存在一定不确定性。

3.2 全岩铂族元素特征

铂族(PGE)元素对母岩浆有明显的继承性特征。铂族的六个元素钌(Ru)、铑(Rh)、钯(Pd)、锇(Os)、铱(Ir)、铂(Pt)的地球化学行为既有共性又有差异。高温下的在大多数地球化学过程中铂族元素表现出一致的地球化学行为^[87-88]。特别是岩浆型 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床的赋矿岩石以超基性岩-基性岩为主,因此铂族元素成为研究早期地史和岩浆硫化物以及铂族起源的最具潜力的痕量元素。

PGE 元素根据其在硅酸盐中不同溶解度可以分为两组: Ir-PGE 组(IPGE: Os、Ir、Ru), Pd-PGE 组(PPGE: Rh、Pt、Pd);前者比后者具有更高的耐火和相容性^[89]。因此根据 PGE 元素的这种特征,可以把 $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})$ 值作为其分异的指示剂。在软流圈同一层位中,未分异的物质的 $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})$ 值应该接近 1; $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})$ 值会随着部分熔融的程度增加而降低和岩浆分异程度的增加而增加。一般

来说, Pt/Pt^* 与 $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})$ 的比值可以用来判别岩浆来源是结晶分异或地幔残留物质的部分熔融^[90]。通过采用 $w(\text{PPGE})-w(\text{IPGE})$ 、 $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})-\text{Pt}/\text{Pt}^*$ 样点投图(图 3),可见赋存铬铁矿与铜镍矿的基性-超基性岩具有明显的不同区域:铜镍矿基性-超基性岩全岩具有高的 $w(\text{PPGE})/w(\text{IPGE})=0.06\sim343.75$ (平均 16), $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})>1$; 铬铁矿基性-超基性岩全岩具有低的 $w(\text{PPGE})/w(\text{IPGE})=0.0004\sim20.34$ (平均值 0.55), $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})<1$ 。同时, PGE 的原始地幔标准,两类矿床也具有明显的不同(图 4): 铬铁矿 PGE 的原始地幔标准表现为轻微右倾,而铜镍矿的原始地幔标准则表现为左倾。这种 PGE 含量的区别和全岩分析 PGE 模式是被认为与铬和硫化物饱和度有关^[91-92]。在岩浆早期阶段, IPGE 较为富集,

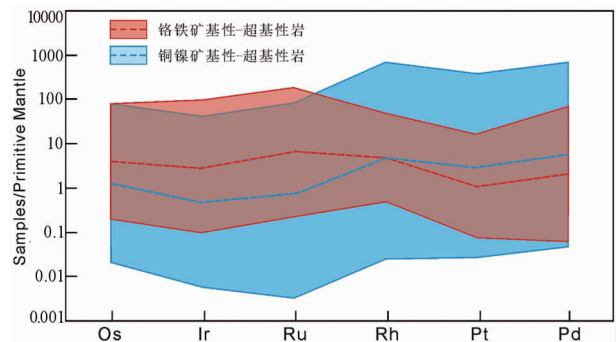


图4 铬铁矿基性-超基性岩、铜镍矿基性-超基性岩铂族元素原始地幔标准化配分模式

Fig. 4 Primitive mantle normalized PGE pattern of the Chromium ore-hosted and Cu-Ni ore-hosted basic-ultrabasic rocks

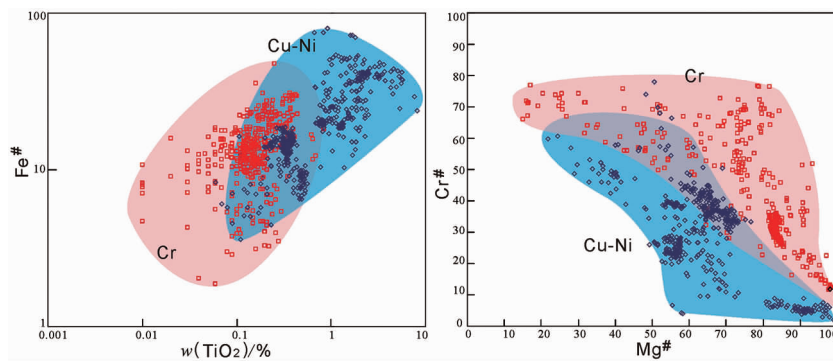


图5 铬铁矿基性-超基性岩与铜镍矿基性-超基性岩内铬铁矿尖晶石

 $\text{Fe}^\# - w(\text{TiO}_2)$ 、 $\text{Cr}^\# - \text{Mg}^\#$ 图Fig. 5 $\text{Fe}^\# - w(\text{TiO}_2)$ 、 $\text{Cr}^\# - \text{Mg}^\#$ Plot of chromium spinel of the Chromium ore-hosted and Cu-Ni ore-hosted basic-ultrabasic rocks

甚至能以合金被发现于铬铁矿内,而在熔体-岩石阶段,PPGE 可能会溶解在硫不饱和的熔体中,之后沿着晶体界面再沉积新的硫化物,这些硫化物倾向于富集 PPGE 并且亏损 IPGE^[93-94]。

3.3 铬铁矿尖晶石征值

铬铁矿尖晶石作为镁铁质-超镁铁质岩浆结晶时最先结晶出来的矿物之一,它具有高密度(4~4.9 g/cm³)、高硬度(8±)、耐高温(1 200~1 300℃)和抗腐蚀性的特点^[95],能够经历长期的地质作用(变形、变质作用)而不发生重大变化,因此是一直以来被用来作为一个有效的岩石学和大地构造指示标志^[95]。

将两类成矿岩石内的铬铁矿尖晶石的主量元素进行投图(图5),可见铬铁矿基性-超基性岩内的铬铁矿尖晶石具有低 $w(\text{TiO}_2)$ 值,低 $\text{Fe}^\#$ 值;铜镍矿基性-超基性岩内的铬铁矿尖晶石则具有高 $w(\text{TiO}_2)$ 、高 $\text{Fe}^\#$ 值。此外,在相同的 $\text{Mg}^\#$ 值下,铬铁矿的 $\text{Cr}^\#$ 大于铜镍矿的 $\text{Cr}^\#$ 。铬铁矿尖晶石结晶较早,可以反映原始母岩浆的性质, $\text{Fe}^\#$ 可以反映氧化还原性质,一般也认为基性-超基性岩铜镍矿化与硫饱和密切相关^[18],其受到了氧化还原条件的控制,氧逸度越高硫越容易达到饱和。因此,含铬铁矿基性-超基性岩母岩浆应该为低 Ti,还原型;而含铜镍矿母岩浆则为高 Ti,氧化型。

4 结语

(1)基于全岩的主量元素对于铜镍与铬铁矿判别有一定区别,但存在重叠区域也较多,因此单纯通过 m/f 比值多少确定是否成矿还有待进一步商榷。

含铬铁矿的基性-超基性岩具有高 MgO 、低 CaO 、 K_2O 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 P_2O_5 特征;而含铜镍矿的基性-超基性岩则具有低 MgO 、高 CaO 、 K_2O 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 P_2O_5 特征。

(2)铜镍矿基性-超基性岩全岩具有高 $w(\text{PPGE})/w(\text{IPGE}) = 0.06 \sim 343.75$ (平均 16), $w(\text{Pd})/w(\text{Ir}) > 1$, 具有右倾的原始地幔配分模式;铬铁矿基性-超基性岩全岩具有低 $w(\text{PPGE})/w(\text{IPGE}) = 0.0004 \sim 20.34$ (平均 0.55), $w(\text{Pd})/w(\text{Ir}) < 1$, 具有左倾的原始地幔配分模式。

(3)铜镍矿基性-超基性岩内铬铁矿尖晶石具有高 TiO_2 、 $\text{Fe}^\#$ 值, $\text{Cr}^\#$ 、 $\text{Mg}^\#$ 较大变化范围的特征;铬铁矿基性-超基性岩铬铁矿尖晶石则具有低 TiO_2 、 $\text{Fe}^\#$ 、 $\text{Mg}^\#$ 值,高 $\text{Cr}^\#$ 特征。

综上,利用基性-超基性岩的铂族元素与铬铁矿地球化学特征参数能够指导与基性-超基性岩有关的铜镍矿和铬铁矿找矿工作。

致谢:在成文过程中,编辑老师和审稿人提出了诸多宝贵修改意见,在此表示诚挚谢意。

参考文献:

- [1] 陈明辉,尹灏,杨长明,等.湖南龙王江铋矿床地质地球化学特征、成矿分析与找矿[J].地质找矿论丛,2018,33(1):31-40.
- [2] 刘文恒,刘继顺,罗江华,等.东川南缘雪岭矿区隐伏铜矿地质地球化学特征及成矿机制[J].地质找矿论丛,2018,33(4):495-506.
- [3] 马忠林.桂西北微细浸染型金矿中铂族元素的发现及其找矿意义[J].地质找矿论丛,2019,34(1):10-14.
- [4] 张凯,刘文建,陈亚伟,等.南秦岭观花坪铜银矿床地质特征及找矿标志[J].地质找矿论丛,2019,34(1):15-20.

- [5] 周云满, 张长青, 和中华, 等. 滇西北衙金多金属矿床成矿作用特征标志[J]. 地质找矿论丛, 2018, 33(1): 1-14.
- [6] 蔡鹏捷, 许荣科, 郑有业, 等. 基于成矿流体包裹体的勘探——以柴北缘鱼卡造山型金矿为例[J]. 地质找矿论丛, 2018, 33(4): 651-660.
- [7] 蔡鹏捷, 许荣科, 朱本杰, 等. 湖北嘉鱼蛇屋山红土型金矿研究回顾与展望[J]. 地质论评, 2016, 62(2): 389-397.
- [8] 孙姣姣, 张廷斌, 易桂花, 等. 西藏地堡那木岗斑岩型铜矿多光谱遥感蚀变矿物组合分带特征[J]. 地质找矿论丛, 2018, 33(3): 466-473.
- [9] 何大芳, 邹明亮, 于玉帅, 等. 桂东北紫花坪岩体富Li淡色花岗岩石地球化学特征及其与铀成矿关系[J]. 地质找矿论丛, 2018, 33(3): 335-345.
- [10] 陈建立. 老湾花岗岩体与金成矿关系新认识及其找矿意义[J]. 地质找矿论丛, 2018, 33(3): 351-359.
- [11] Pisiak L K, Canil D, Lacourse T, et al. Magnetite as an Indicator Mineral in the Exploration of Porphyry Deposits: A Case Study in Till near the Mount Polley Cu-Au Deposit, British Columbia, Canada [J]. *Economic Geology*, 2017, 112(4): 919-940.
- [12] Harlov D E. Apatite: A fingerprint for metasomatic processes [J]. *Elements*, 2015, 11(3): 171-176.
- [13] Maydagán L, Franchini M, Lentz D, et al. Sulfide composition and isotopic signature of the altar cu-au deposit, argentina: constraints on the evolution of the porphyry-epithermal system [J]. *Canadian Mineralogist*, 2013, 51(6): 813-840.
- [14] 吕林素, 刘珩, 张作衡, 等. 中国岩浆型Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床的时空分布及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2561-2594.
- [15] 吴利仁. 论中国基性岩、超基性岩的成矿专属性[J]. 地质科学, 1963, 4(1): 29-41.
- [16] 代俊峰, 宫磊, 霍永豪. 含矿基性-超基性岩的镁铁比值[J]. 地质找矿论丛, 2016, 31(1): 42-46.
- [17] 蔡鹏捷, 国显正, 郑有业, 等. 岩浆型Ni-Cu-PGE硫化物矿床研究现状及进展[J]. 地质论评, 2018, 64(4): 956-979.
- [18] Barnes S, Cruden A, Arndt N, et al. The mineral system approach applied to magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits [J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 76: 296-316.
- [19] И Д 索波列夫, 袁荣林. 超基性岩及与其有关的矿床[J]. 地质科学, 1958, 1(3): 28-31.
- [20] 孙鼎. 火成岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 1-324.
- [21] 白文吉, 周美付. 新疆洪古勒楞蛇绿岩套中堆积杂岩的地球化学特征及成因[J]. 地球学报, 1991(3): 63-78.
- [22] 黄增保. 甘肃大道尔吉铬铁矿床成矿岩体地球化学特征及其研究意义[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [23] 黄圭成. 西藏雅鲁藏布江西段蛇绿岩及铬铁矿研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
- [24] 叶培盛, 江万, 吴珍汉, 等. 西藏泽当—罗布莎蛇绿岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 现代地质, 2006, 20(3): 370-377.
- [25] Hassanipak A A, Ghazi A M. Petrology, geochemistry and tectonic setting of the khoy ophiolite, northwest iran: implications for tethyan tectonics [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(1): 109-121.
- [26] Shojaat B, Hassanipak A A, Mobasher K, et al. Petrology, geochemistry and tectonics of the sabzevar ophiolite, north central iran [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 21(9): 1053-1067.
- [27] Melcher F, Meisel T, Puhl J, et al. Petrogenesis and geotectonic setting of ultramafic rocks in the eastern alps: constraints from geochemistry [J]. *Lithos*, 2002, 65(1-2): 69-112.
- [28] 李彝, 朱赖民, 弓虎军, 等. 北秦岭松树沟橄榄岩与铬铁矿床的成因关系[J]. 岩石学报, 2010, 26(5): 1487-1502.
- [29] 刘建国, 王建. 西昆仑库地蛇绿岩富Al型豆荚状铬铁矿成因[J]. 地质学报, 2016, 90(6): 1182-1194.
- [30] 龙雄志. 内蒙古贺根山蛇绿岩形成构造环境与流体来源研究[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2016.
- [31] 饶万祥. 祁连山玉石沟铬铁矿成矿机理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [32] 徐向珍. 藏南康金拉豆荚状铬铁矿和地幔橄榄岩成因研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2009.
- [33] 李立兴, 李厚民, 崔艳合, 等. 河北高寺台含铬超基性岩杂岩体成岩成矿时代及岩石成因[J]. 岩石学报, 2012, 28(11): 3757-3771.
- [34] 田亚洲. 新疆萨尔托海蛇绿岩中高铝型铬铁矿成因[D]. 北京: 中国地质科学院, 2015.
- [35] 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 等. 金川超大型铜镍硫化物矿床的铂族元素地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(3): 279-286.
- [36] 赵全国. 通化赤柏松镁铁-超镁铁质岩石的形成时代与地球化学特征及对成矿作用的制约[D]. 吉林: 吉林大学, 2006.
- [37] 孙立吉. 红旗岭铜镍硫化物矿床地质地球化学特征及找矿技术方法研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.
- [38] 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.
- [39] 唐冬梅, 秦克章, 孙赫, 等. 天宇铜镍矿床的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征: 对东疆镁铁-超镁铁质岩体源区和成因的制约[J]. 岩石学报, 2009, 25(4): 817-831.
- [40] 焦建刚, 王勇, 钱壮志, 等. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Y9 岩体年代学与成岩成矿机制探讨[J]. 矿床地质, 2014, 33(4): 675-688.
- [41] 杨素红. 新疆喀拉通克铜镍矿岩石学、岩石地球化学及矿物学研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [42] 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 等. 新疆东天山白石泉铜镍矿床基性-超基性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 153-162.
- [43] 邓宇峰, 宋谢炎, 颜炜, 等. 新疆北天山黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体的岩石成因: 主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素证据[J]. 地质学报, 2011, 85(9): 1435-1451.
- [44] 凌锦兰. 柴周缘镁铁质-超镁铁质岩体与镍矿床成因研究

- [D]. 西安:长安大学, 2014.
- [45] 姜常义, 郭娜欣, 夏明哲, 等. 塔里木板块东北部坡一镁铁质-超镁铁质层状侵入体岩石成因[J]. 岩石学报, 2012, 28(7):2209-2223.
- [46] 汤中立. 中国镍铜铂岩浆硫化物矿床与成矿预测[M]. 北京:地质出版社, 2006:1-308.
- [47] 李莹. 攀西地区力马河镁铁-超镁铁质岩体的岩石学和地球化学研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2010.
- [48] 管涛, 黄智龙, 许德如, 等. 云南金平白马寨含矿镁铁-超镁铁岩体岩石地球化学[J]. 地质科学, 2006, 41(3):441-454.
- [49] Krivolutsкая Na, Sobolev Av, Mikhailov Vn, et al. Parental melt of the Nadezhdinsky Formation: Geochemistry, petrology and connection with Cu-Ni deposits (Noril'sk area, Russia) [J]. Chemical Geology, 2012, (s 302-303):87-105.
- [50] Jr G, Dimalanta C, Faustino D, et al. Translation and docking of an arc terrane: geological and geochemical evidence from the southern Zambales Ophiolite Complex, Philippines [J]. Tectonophysics, 1998, 293(3):255-272.
- [51] 王瑞廷. 煎茶岭与金川镍矿床成矿作用比较研究[D]. 西安:西北大学, 2002.
- [52] Said N, Kerrich R, Groves D. Geochemical systematics of basalts of the Lower Basalt Unit, 2.7 Ga Kambalda Sequence, Yilgarn craton, Australia: Plume impingement at a rifted craton margin [J]. Lithos, 2010, 115(1-4):82-100.
- [53] Good D J, Naldrett A J. Geology and distribution of platinum-group elements, Bucko Lake Intrusion, Thompson Belt, Manitoba [J]. Canadian Mineralogist, 1993, 31(1):45-60.
- [54] Wyman Da, Kerrich R, Polat A. Assembly of Archean cratonic mantle lithosphere and crust: plume-arc interaction in the Abitibi-Wawa subduction-accretion complex [J]. Precambrian Research, 2002, 115(1):37-62.
- [55] 葛文春, 李献华, 梁细荣, 等. 桂北元宝山宝坛地区约 825 Ma 镁铁-超镁铁岩的地球化学及其地质意义[J]. 地球化学, 2001, 30(2):123-130.
- [56] 赵莉, 张招崇, 王福生, 等. 一个开放的岩浆房系统:攀西新街镁铁-超镁铁质层状岩体[J]. 岩石学报, 2006, 22(6):1565-1578.
- [57] 高辉, 王安建, 曹殿华, 等. 布什维尔德杂岩体 Platreef 矿床与金川铜镍硫化矿床微量元素地球化学特征对比及其意义[J]. 中国地质, 2009, 36(2):268-290.
- [58] Maier W D, Määtä S, Yang S, et al. Composition of the ultramafic-mafic contact interval of the Great Dyke of Zimbabwe at Ngezi mine: Comparisons to the Bushveld Complex and implications for the origin of the PGE reefs [J]. Lithos, 2015, 238:207-222.
- [59] 傅飘儿, 胡沛青, 张铭杰, 等. 新疆黄山铜镍硫化物矿床成矿岩浆作用过程[J]. 地球化学, 2009, 38(5):432-448.
- [60] 杨合群, 洛长义, 朱宝清, 等. 新疆兴地含铜镍基性超基性侵入体地质特征及成矿条件[J]. 西北地质科学, 1997(2):43-53.
- [61] Turnbull R E, Size W B, Tulloch A J, et al. The ultramafic-intermediate riwaka complex, new zealand: summary of the petrology, geochemistry and related Ni-Cu-PGE mineralisation [J]. New Zealand Journal of Geology & Geophysics, 2017:1-26.
- [62] Mansur E T, Ferreira Filho C F. Magmatic structure and geochemistry of the Luanga Mafic-Ultramafic Complex: Further constraints for the PGE-mineralized magmatism in Carajás, Brazil [J]. Lithos, 2016, 266-267:28-43.
- [63] Salgado S S, Filho C F F, Caxito F D A, et al. The ni-cu-pge mineralized brejo seco mafic-ultramafic layered intrusion, riocho do pontal orogen: onset of tonian (ca. 900 Ma) continental rifting in northeast brazil [J]. Journal of South American Earth Sciences, 2016, 70:324-339.
- [64] Peighambari S, Uysal I, Stosch H G, et al. Genesis and tectonic setting of ophiolitic chromitites from the dehsheikh ultramafic complex (Kerman, southeastern Iran): inferences from platinum-group elements and chromite compositions [J]. Ore Geology Reviews, 2016, 74:39-51.
- [65] Jr G C B, Kay R W, Gibbs A K, et al. Platinum-group element abundance and distribution in chromite deposits of the acoje block, zambales ophiolite complex, Philippines [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1990, 37(1):113-145.
- [66] Büchl A, Brüggemann G, Batanova V G. Formation of podiform chromite deposits: implications from PGE abundances and Os isotopic compositions of chromites from the troodos complex, Cyprus [J]. Chemical Geology, 2004, 208(1):217-232.
- [67] Dönmez C, Keskin S, Günay K, et al. Chromite and pge geochemistry of the elekda? ophiolite (kastamonu, northern turkey): implications for deep magmatic processes in a supra-subduction zone setting [J]. Ore Geology Review, 2014, 57:216-228.
- [68] 连东洋, 杨经绥, 熊发挥, 等. 雅鲁藏布江缝合带西段达机翁地幔橄榄岩及铬铁矿的铂族元素特征[J]. 中国地质, 2015, 42(2):525-546.
- [69] 赵东宏. 宁夏小松山铬铁矿床中铂族元素矿化特征及成因探讨[J]. 西北地质, 1992(1):21-26.
- [70] 曾认宇, 赖健清, 毛先成, 等. 金川铜镍硫化物矿床铂族元素地球化学差异及其演化意义[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(1):149-163.
- [71] Zhang Z, Tang Q, Li C, et al. Sr-Nd-Os-S isotope and PGE geochemistry of the xiarihamu magmatic sulfide deposit in the qinghai-tibet plateau, China [J]. Mineralium Deposita, 2016, 52(1-1):1-18.
- [72] 徐刚. 甘肃北山地区黑山铜镍硫化物矿床成矿作用研究[D]. 西安:长安大学, 2013.
- [73] 陶琰, 胡瑞忠, 漆亮, 等. 四川力马河镁铁-超镁铁质岩体的地球化学特征及成岩成矿分析[J]. 岩石学报, 2007, 23(11):2785-2800.
- [74] Seat Z, Beresford S W, Grguric B A, et al. Reevaluation of the role of external sulfur addition in the genesis of Ni-Cu-

- PGE deposits: evidence from the nebo-babel Ni-Cu-PGE deposit, west musgrave, western Australia [J]. *Economic Geology*, 2009, 104(4): 521–538.
- [75] Dare S, Barnes S, Prichard H. Chalcophile and platinum-group element (PGE) concentrations in the sulfide minerals from the McCreedy East deposit, Sudbury, Canada, and the origin of PGE in pyrite [J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46(4): 381–407.
- [76] Zhou M F, Robinson P T, Su B X, et al. Compositions of chromite, associated minerals, and parental magmas of podiform chromite deposits: the role of slab contamination of asthenospheric melts in suprasubduction zone environments [J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(1): 262–283.
- [77] Huang Y, Wang L, Kusky T, et al. High-Cr chromites from the late proterozoic miaowan ophiolite complex, south CHINA: implications for its tectonic environment of formation [J]. *Lithos*, 2017, 288–299: 35–54.
- [78] Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, et al. Melt-mantle interaction and melt evolution in the artohay high-Al chromite deposits of the Dalabute ophiolite (NW China) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2001, 19: 517–534.
- [79] Arif M, Jan M Q. Petrotectonic significance of the chemistry of chromite in the ultramafic-mafic complexes of Pakistan [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27(5): 628–646.
- [80] 张志炳, 李文渊, 张照伟, 等. 东昆仑夏日哈木岩浆铜镍硫化物矿床铬尖晶石特征及其指示意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(5): 966–975.
- [81] Ruan B, Yu Y, Lv X, et al. Occurrence and mineral chemistry of chromite and related silicates from the Hongshishan mafic-ultramafic complex, NW China with petrogenetic implications [J]. *Mineralogy & Petrology*, 2017, 111: 693–708.
- [82] Evans D M. Chromite compositions in nickel sulphide mineralized intrusions of the Kabanga-Musongati-Kapalagulu Alignment, East Africa: Petrologic and exploration significance [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 90: 307–321.
- [83] Wang C Y, Zhou M F, Zhao D. Mineral chemistry of chromite from the permian jinbaoshan pt-pd-sulphide-bearing ultramafic intrusion in sw China with petrogenetic implications [J]. *Lithos*, 2005, 83(1): 47–66.
- [84] 王梦玺, 王焰. 扬子地块北缘周庵超镁铁质岩体矿物学特征及其对铜镍矿化的启示[J]. *矿床地质*, 2012, 31(2): 179–194.
- [85] Bennett V C, Norman M D, Garcia M O. Rhenium and platinum group element abundances correlated with mantle source components in Hawaiian picrites: sulphides in the plume [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2000, 183(3): 513–526.
- [86] 蔡鹏捷, 郑有业, 陈鑫, 等. 柴达木盆地北缘开屏沟纯橄岩中铬铁矿环带成因及其构造意义[J]. *地质学报*, 2019, 93(3): 647–660.
- [87] 倪善芹, 侯泉林, 琚宜文, 等. 铂族元素作为地球化学指示剂有关问题讨论[J]. *地质论评*, 2007, 53(5): 631–641.
- [88] 蔡鹏捷, 许荣科, 郑有业, 等. 柴北缘从大洋俯冲到陆陆碰撞: 来自开屏构造山带 M 型橄榄岩的证据[J]. *地球科学*, 2018, 43(8): 2875–2892.
- [89] Barnes S J, Naldrett A J, Gorton M P. The Origin of the Fractionation of Platinum-Group Elements in Terrestrial Magmas [J]. *Chemical Geology*, 1985, 53(3): 303–323.
- [90] Bea F, Pushkarev E V, Garuti G, et al. Platinum-Group Elements as Petrological Indicators in Mafic-Ultramafic Complexes of the Central and Southern Urals: Preliminary Results [J]. *Tectonophysics*, 1997, 276(1): 181–194.
- [91] Barnes S J, Boyd R, Korueiliussen A, et al. The use of mantle normalization and metal ratios in discriminating between effects of partial melting, crystal fractionation and sulphide segregation on platinum-group elements, gold, nickel and Cu: Examples from Norway [C]//H M Prichard, J P Potts, J F W Bowles and S J Gribbs (Editors). *Geo-Platinum 87*. Elsevier, London, 1988: 113–143.
- [92] Gruenewaldt G V, Horsch H, Dickst D, et al. PGE mineralization in the western sector of the eastern bushveld complex [J]. *Mineralogy & Petrology*, 1990, 42(1–4): 71–95.
- [93] Alard O, Griffin L, Lorand J P, et al. Non-chondritic distribution of the highly siderophile elements in mantle sulphides [J]. *Nature*, 2000, 407: 891–894.
- [94] Rudnick R L, Walker R J. Interpreting ages from Re-Os isotopes in peridotites [J]. *Lithos*, 2009, 112S: 1083–1095.
- [95] Barnes S J, Roeder P L. The Range of Spinel Compositions in Terrestrial Mafic and Ultramafic Rocks [J]. *Journal Petrology*, 2001, 42(12): 2279–2302.

Discriminaton of specific attributive of Cu-Ni ore or Cr ore to basic-ultrabasic rocks

LIU JIA¹, CAI Pengjie²

(1. *Institute of Geological Survey, Hubei Province, Wuhan 430074, China;*

2. *Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China*)

Abstract: The geochemical data of whole rock and minerals are often used to discriminate genesis and geotectonic setting of rocks. In fact, they can also be used to discriminate specific attributive of ores to the rocks so as to guide the prospecting work. The geochemical characteristics of major elements and PGE of the whole rock and those of chromium spinel from the copper-nickel ore or Cr ore hosted basic-ultrabasic rocks are comparatively studied. The results show that: 1) the ratio of m/f of the copper-nickel ore hosted basic-ultrabasic rocks is mainly concentrated in range of 1.5 to 8.5, and chromite ore-hosted basic-ultrabasic rocks in range of 6.5 to 12.5. A certain overlap occur so there is some uncertainty to determine which ore will occur by using the ratio. The binary diagram of the major elements of whole rock also show some overlap and can not effectively discriminate the specific attributive. 2) The Cu-Ni ore-hosted basic-ultramafic rocks exhibit high $w(\text{PPGE})/w(\text{IPGE})$ values (0.06 to 343.75, average 16), $w(\text{Pd})/w(\text{Ir}) > 1$, left inclined primitive mantle normalized pattern of PGE of the whole rock, and their chromium spinels high $w(\text{TiO}_2)$, $\text{Fe}^\#$ values, and wide range of $\text{Fe}^\#$, $\text{Cr}^\#$ and $\text{Mg}^\#$ value; 3) the chromium ore-hosted basic-ultrabasic rocks show low $w(\text{PPGE})/w(\text{IPGE})$ values (0.000 4 to 20.34, average 0.55), $w(\text{Pd})/w(\text{Ir}) < 1$, right inclined primitive mantle normalized pattern of PGE, and their Cr spinel low $w(\text{TiO}_2)$, $\text{Fe}^\#$, $\text{Mg}^\#$ values and high $\text{Cr}^\#$ Values. Therefore, the geochemical characteristics of PGE and chromite of the basic-ultramafic rocks can effectively indicate their ore-forming specific attributive and become a tool for exploration of chromite and copper-nickel deposits in basic-ultrabasic rocks.

Key Words: basic-ultrabasic rocks; Cu-Ni deposit; chromite deposit; PGE; chromite spinel