

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2015.S1.016

博茨瓦纳赛莱比-皮奎铜镍硫化物矿床研究进展

任军平,许康康,刘晓阳,王 杰,

左立波,孙 凯,何胜飞,贺福清

(中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170)

摘要: 文章对博茨瓦纳铜镍硫化物矿床的研究成果进行了总结,概括了赛莱比-皮奎铜镍硫化物矿床的区域地质背景、岩石地层划分,较系统地分析了矿床的地质特征和矿床成因;认为铜镍硫化物矿床的成矿物质来源多样,并且矿床形成后经历了强烈的褶皱和剪切作用。

关键词: 赛莱比-皮奎铜镍硫化物矿床;地质特征;林波波变质带;博茨瓦纳

中图分类号: P613;P618.41 **文献标识码:** A

0 引言

博茨瓦纳的矿产资源颇为丰富,是非洲第二大矿产品生产国,主要矿藏有金刚石、铜镍、铂、金、锰、煤、苏打灰和天然气等,此外,石油资源也正在勘探中。铜镍是继钻石之外的重要出口矿产品,2011年产量为 3.2×10^4 t。铜镍矿床主要分布在东部地区的林波波带中,形成于太古宙。已探明的铜镍矿蕴藏量为 46×10^6 t,已发现赛莱比-皮奎(Selebi-Phikwe)、马奇塔马(Matsitama)、塔蒂(Tati)三大矿化集中区,矿床(点)多达40余个,还有大面积的基性-超基性岩被覆盖,具有很大的找矿潜力。目前主要的矿床有赛莱比-皮奎、马奇塔马、杜克韦(Dukwe)和塔蒂等矿床。博茨瓦纳的铜镍矿床主要有3种类型:①岩浆型浸染状和块状铜镍硫化物矿床,主要位于赛莱比-皮奎地区基性-超基性侵入体内,代表性矿床包括赛莱比-皮奎、迪科罗蒂(Dikoloti)及弗巨济(Phokoje)等矿床,这些矿床大多数在1963—1966年由巴芒瓦图特许(Bamangwato Concessions)有限公司发现;②火山岩型浸染状硫化物铜矿床,主要位于马奇塔马地区绿岩带内及外围的基

性杂岩体中,代表性矿床包括菲尼克斯(Phoenix)、塞尔科克(Selkirk)和塔克旺(Tekwane)等矿床,这些矿床主要是1963年由博茨瓦纳苔草(Sedge Botswana)有限公司通过地质填图发现;③其他类型,主要包括夕卡岩型铜矿、斑岩型铜矿和热水喷流型铜矿等。其中以岩浆型铜镍硫化物矿床和火山岩型硫化物铜矿为主,特别是赛莱比-皮奎铜镍矿床在博茨瓦纳矿产开发中占有重要的地位。

塞莱比-皮奎铜镍矿床位于博茨瓦纳东部的塞莱比-皮奎市,距离首都哈博罗内(Gaborone)约410 km,距离北部弗朗西斯敦(Francistown)150 km。矿床中心位置的地理坐标为 $21^{\circ}57'07''\text{S}$, $27^{\circ}51'41''\text{E}$ 。矿床的生产企业为巴芒瓦图特许有限公司,该公司成立于1956年8月,现由博茨瓦纳政府(94%)和诺里尔斯科镍业(Norilsk Nickel)公司(6%)共同拥有。公司网站资料显示,塞莱比-皮奎铜镍矿床1974年投产,年产矿产品约 4×10^4 t,主要出口津巴布韦和挪威。赛莱比矿体是1963年巴芒瓦图特许有限公司运用区域土壤化探方法发现的,1966年发现皮奎矿体,之后又发现了若干小矿化点。经过调查,这些矿化点都具有很大的经济价值。赛莱比-皮奎是博茨瓦纳东部最大的矿床,仅皮奎矿体的规模就达 $3\ 100 \times 10^4$ t(表1)。

收稿日期: 2015-07-01; 改回日期: 2015-10-09; 责任编辑: 岳振欢

基金项目: 中国地质调查局项目《非洲中南部重要矿床地质背景、成矿作用和找矿潜力研究》(编号:1212011220910)及国外风险勘查基金项目(编号:科[2011]D3-04)资助。

作者简介: 任军平(1980—),男,高级工程师,主要从事地质矿产勘查与研究工作。通信地址:天津市河东区大直沽八号路4号,中国地质调查局天津地质调查中心;邮政编码:300170;E-mail:rjp2333@126.com

表 1 博茨瓦纳东南部主要铜镍矿床(体)的矿石储量

Table 1 Estimated ore reserves of major

Ni-Cu deposits in SE Botswana

矿床(体)名称	矿石储量/ 10^4 t	铜品位/%	镍品位/%	Cu/Ni
菲尼克斯矿床	4 500	0.85	2.05	0.41
塞尔科克矿床	330	0.81	0.93	0.87
塔克旺矿床	60	0.60	1.20	0.50
皮奎矿体	3 100	1.12	1.36	0.82
赛莱比矿体	1 260	1.50	0.74	2.03
赛莱比北部矿体	190	0.97	0.86	1.13
迪科罗蒂矿床	250	0.50	0.70	0.71

巴芒瓦图特许有限公司现有职工 4 200 人,是博茨瓦纳矿山企业中员工最多的。该公司网站最新公布(2011 年 6 月 31 日)的镍铜的金属量分别为 33.4×10^4 t 和 37.0×10^4 t,矿床镍铜品位分别为 0.61% 和 0.68%,目前开采最大深度为 1 380 m。为扩大资源量,公司投入资金在矿区外围 240 km² 的区域内开展勘探工作。

我们在执行国家地质调查项目“非洲中南部重要矿床地质背景、成矿作用和找矿潜力研究”项目(编号:1212011220910)及国外风险勘查基金项目(编号:[2011]D3-04)期间^[1-6],对赛莱比-皮奎铜镍矿床有关研究文献进行了系统收集和整理,对地质特征和成矿模式进行了总结。

1 地质背景

1.1 区域地层

赛莱比-皮奎铜镍矿床位于基性-超基性侵入体内,含矿岩体为角闪岩,主要由角闪石、长石、铝直闪石及云母组成,含有少量变质斜方辉石及橄榄石^[7]。Brown(1988)认为该侵入体的含矿母岩岩浆为拉斑玄武岩($w(\text{MgO}) = 8\%$),主要由橄榄石(Fo_{85})、辉石(En_{85})和斜长石(An_{83})组成^[8]。围岩包括中粗粒微弱片理化的变斑状花岗岩片麻岩,各种条带状片麻岩(表壳岩)、未分副片麻岩及正片麻岩组成(图 1),岩石地层特征见表 2。

表 2 赛莱比-皮奎铜镍矿床地层层序^[9]

Table 2 Lithostratigraphy of Selebi-Phikwe Cu-Ni deposit

分层号	分层单元	岩石学特征
10	变沉积岩(类似于 Baines Drift 建造) ^[10]	方解石/白云石大理岩和夹少量泥质岩、铁矿石和斜长岩层位的石英岩
9	泥质片岩	含堇青石-夕线石-石榴石的黑云母片岩,局部见片麻状夹层
8	透辉斜长角闪岩	含角闪片麻岩的带状辉石斜长角闪岩和石榴角闪岩
7	黑云母角闪片麻岩	多种混合岩化的局部夹夕线石薄层的灰色片麻岩
6	矿层	含磁黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿和磁铁矿的角闪岩
5	条带状粉红色片麻岩	夹少量灰色片麻岩的混合花岗岩片麻岩和薄层状堇青石-夕线石-黑云母片麻岩
4	斜长角闪片麻岩	向上为逐渐过渡,并伴随着角闪石的增加
3	钙长片麻岩	斜长岩-钙长辉长岩质拉长角闪片麻岩 ^[11]
2	石英长石片麻岩	富石英粉红色条带状片麻岩
1	基底:花岗岩片麻岩	粉红色花岗岩片麻岩,局部见斑状特征

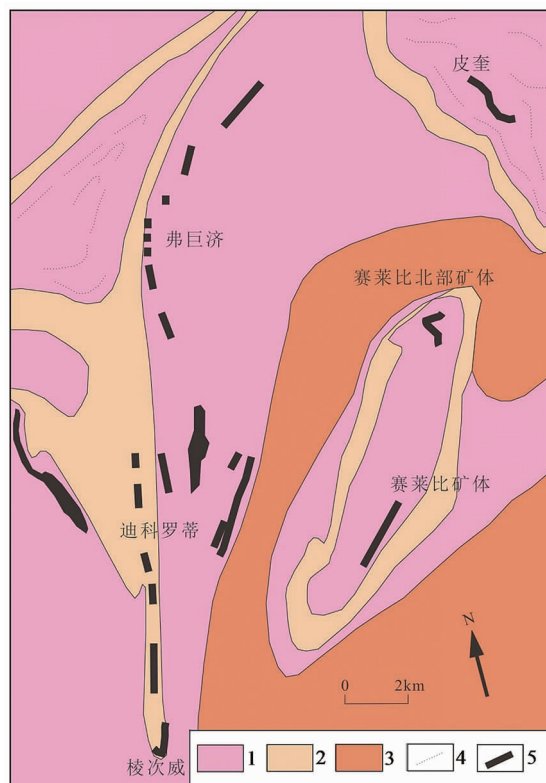
图 1 赛莱比-皮奎铜镍矿床地质简图^[11]

Fig. 1 Geological sketch of Selebi-Phikwe Cu-Ni deposit

1. 未分的正(副)片麻岩;2. 斜长片麻岩;3. 花岗岩片麻岩;
4. 构造线;5. 矿层或超基性岩

1.2 构造演化及变质作用

赛莱比-皮奎铜镍矿床位于卡普瓦拉克拉通和津巴布韦克拉通之间的林波波变质带中,该变质带出露范围 250 km $\times$ 550 km,主要出露岩性为太古宙-古元古代高级复变质相岩石。林波波变质带包含不同时期(3 200~2 600 Ma)的地质体,并且具有复杂的构造变形历史(2 700~2 040 Ma)^[12]。该带主要包括中部带、南部边缘带和北部边缘带三部分,其中赛莱比-皮奎铜镍矿床位于中部带中(图 2)。

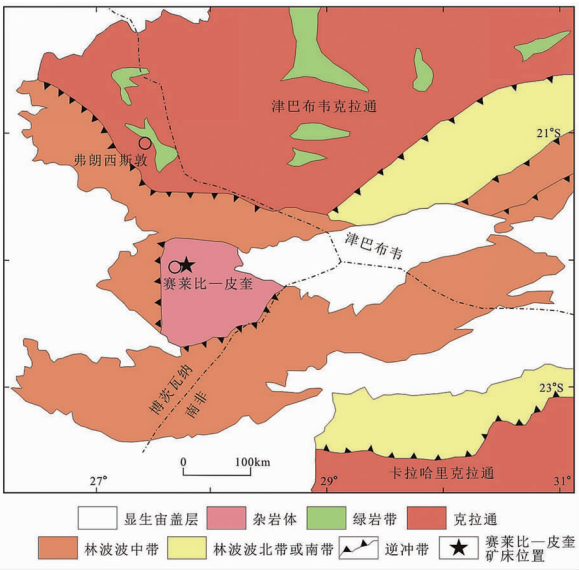


图 2 赛莱比-皮奎矿床大地构造位置^[7]

Fig. 2 Geotectonic position of Selebi-Phikwe Cu-Ni deposit

赛莱比-皮奎铜镍矿床位于皮奎杂岩体中,经历了 3 期构造作用(D_1 , D_2 和 D_3),即包括褶皱和叶理的演化,又伴随有同期的变质作用,形成与构造作用配套的 3 个变质-变形期次(M_1 , M_2 和 M_3),即麻粒岩相-角闪岩相-绿片岩相^[9],具体特征见表 3。

1.3 区域矿产分布

博茨瓦纳东部有 4 个矿集区和 1 个异常区,包括奥拉帕金刚石矿集区、马奇塔马铜矿集区、塔蒂铜镍矿集区、赛莱比-皮奎铜镍矿集区和沃姆巴(Vumba)铜镍异常区,矿种包括铜镍矿床、铜矿床、铁矿床、锰矿床和金刚石矿床等(图 3),代表性矿床有奥拉帕金刚石矿床、马奇塔马铜矿床、塞尔科克铜镍矿床和赛莱比-皮奎铜镍矿床。

2 矿床地质特征

2.1 矿体分布形态

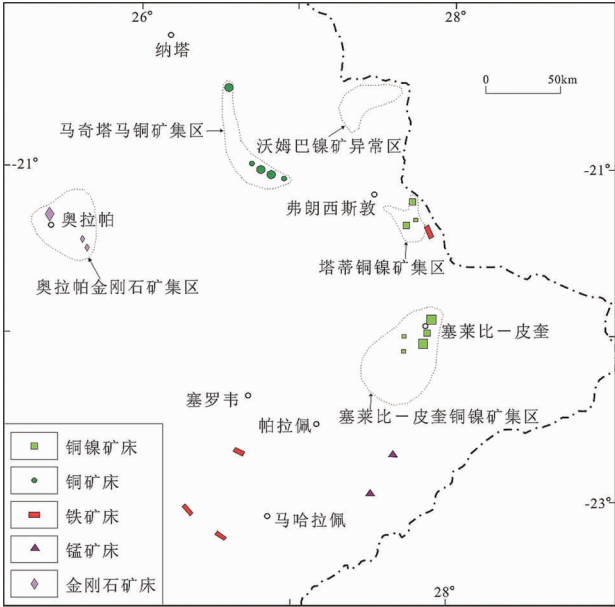


图 3 博茨瓦纳东部矿床分布图(据文献^[15]修改)

Fig. 3 Map showing distribution of ore deposits in the east Botswana

赛莱比-皮奎矿床南北宽约 14 km,东西宽约 8 km,主要包括 5 个相对独立的矿体,由北向南依次为皮奎矿体、皮奎中部矿体、皮奎东南延伸矿体、赛莱比北部矿体和赛莱比矿体(图 4a)。矿体与夹有多种片麻岩薄层的层状细-中粒角闪岩有关,含矿侵入体通常较薄,呈层状(图 4b),皮奎矿体的平均厚度为 11 m^[16],后期受到强烈的褶皱及剪切作用的影响,局部矿体呈香肠状^[8-9,17-19],褶皱转折端矿体加厚的特征明显。

2.2 矿床规模

在 Gordon 1973 年公布的数据^[18](表 1)中,皮奎矿体、赛莱比矿体和赛莱比北部矿体 3 个矿体的矿石储量为 $4\,550 \times 10^4$ t,铜的平均品位 1.22%,金属量为 55.4×10^4 t,镍的平均品位 1.17%,金属量为 53.1×10^4 t。而巴芒瓦图公司 2011 年公布的数据^[20](表 4)表明,赛莱比-皮奎矿床 5 个矿体的矿石

表 3 赛莱比-皮奎铜镍矿床构造及变质演化^[9,13,14]

Table 3 Structural and metamorphic evolutionary history of Selebi-Phikwe Cu-Ni deposit

构造期次		变质作用期次		年龄/Ma
顺序	特征	顺序	特征	
D_3	主褶皱走向 NE,轴面近直立	M_3	斜长角闪岩相过渡到绿片岩相	$2\ 000\pm 50(D_3\text{ 后期隆升年龄})$
D_2	局部形成平卧碎裂叶理	M_2	斜长角闪岩相	
	走向 NE 的平卧主褶皱		上部斜长角闪岩相,局部见深熔作用	
D_1	片麻理和线理,褶皱走向 NNE	M_1 晚期	D_1 阶段晚期就位的伟晶岩和深熔花岗岩	$2\ 660\pm 40$
		M_1	形成中压麻粒岩相岩石($770\text{ }^{\circ}\text{C};760\text{ MPa}$)并部分熔融	

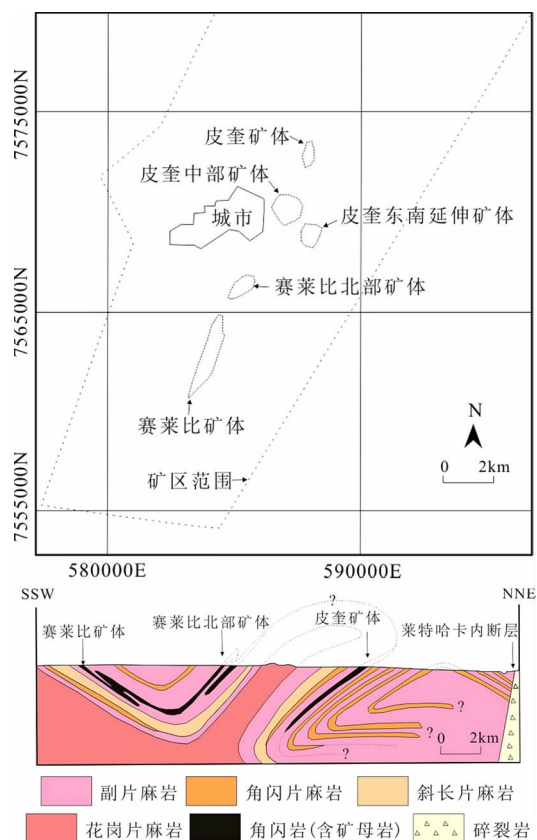


图4 赛莱比-皮奎铜镍矿床矿体分布平(剖)面图^[3]

Fig. 4 Map showing distribution of ore bodies in Selebi-Phikwe Cu-Ni deposit

表 4 赛莱比-皮奎铜镍矿床矿石储量^[20]

Table 4 Mineral reserves of Selebi-Phikwe Cu-Ni deposit

矿体名称	矿石量/ 10^4 t	品位 $w_B/\%$		金属量/ 10^4 t	
		铜	镍	铜	镍
皮奎矿体	2 151	0.43	0.45	9.29	9.73
皮奎中部矿体	1 500	0.73	0.64	10.90	9.62
皮奎东南延伸矿体	305	0.83	1.02	2.53	3.11
赛莱比北部矿体	276	0.70	0.88	1.93	2.43
赛莱比矿体	1 212	1.02	0.70	12.33	8.52
合计	5 445	0.68	0.61	36.99	33.40

储量为 $5\,445 \times 10^4$ t, 铜的平均品位0.68%, 金属量为 36.99×10^4 t, 镍的平均品位为0.61%, 金属量为 33.40×10^4 t。根据中国的矿产资源储量规模划分标准(2000), 赛莱比-皮奎铜镍矿床属于大型铜镍矿床, 如根据汤中立(2002)提出的超大型镍铜划分标准^[21], 则该矿床当属超大型铜镍矿床。

2.3 矿石结构构造

矿床中的硫化物以自形、半自形及他形粒状为主, 磁铁矿中不透明矿物的体积分数达20%左右^[9]。根据 Wakefield(1976)提出的矿石分类, 矿石

构造包括伟晶状、块状、半块状、浸染状、细脉状和不混溶气泡状等^[9]。在矿床中, 浸染状和团块状硫化物遍布整个角闪岩相岩石, 局部厚度可达38 m, 尤其在角闪岩和片麻岩的接触带附近, Brown(1988)认为该构造特征说明了硫化物经历了多期强烈的构造作用^[8]。

2.4 矿物组合

矿床内主要的硫化物为磁黄铁矿、黄铜矿和镍黄铁矿, Wakefield(1976)以这3种硫化物为整体估算出质量分数分别为84%, 8%和8%, 其中黄铜矿主要集中在硅酸盐包体内或周围^[9]。其他少量硫化物包括磁铁矿、紫硫镍铁矿及白铁矿等, 后期热液和表生蚀变作用期的硫化物包括镍黄铁矿、白铁矿、黄铁矿及硫镍矿等^[16]。

2.5 同位素年代学

赛莱比-皮奎地区的花岗片麻岩的年龄, McCourt等(2004)通过U-Pb 锆石 SHRIMP 法测得年龄为2 600 ~ 2 650 Ma^[22]。根据 Wright^[23]和Brown^[8]的研究发现, 该花岗片麻岩与表壳岩具有侵入关系, 因此可以推测表壳岩的年龄要大于2 600 Ma。由于岩石接触关系多为构造接触, 因此对于基性-超基性侵入体的年龄目前还不清楚, 推测大于2 000 Ma^[7]。

3 矿床成因

3.1 元素地球化学特征

3.1.1 微量元素、稀土元素、常量元素特征

赛莱比-皮奎地区的样品中 K, U, Ba 和 Cs 元素具有正异常特征(图5), 大部分的样品(特别是迪科罗蒂的样品)相对富集轻稀土元素和Th元素, $(Th/Yb)_N = 4.22$ (图5a), 这种特征与陆壳组分特征相似(图5b)。值得注意的是, 赛莱比-皮奎的样品也具有塔蒂样品相对平坦的微量元素模式^[7]。

Maier等^[7]认为赛莱比-皮奎矿集区内岩石的微量元素具有堆晶岩的特征, 如分析的斜长角闪岩 $w(Hf) < 0.5 \times 10^{-6}$, 然而典型的大洋和大陆拉斑玄武岩 $w(Hf) = 1 \times 10^{-6} \sim 7 \times 10^{-6}$ ^[24]。皮奎样品中微量元素变化较大, 说明成矿流体的来源复杂(如块状硫化物中存在斜长角闪岩包体)。Brown^[8]认为常量元素含量与所研究的侵入体母岩体特征基本一致, 暗示大的包体代表了围岩的碎块, 角闪片麻岩就是变质的玄武岩。赛莱比-皮奎样品的特征类似

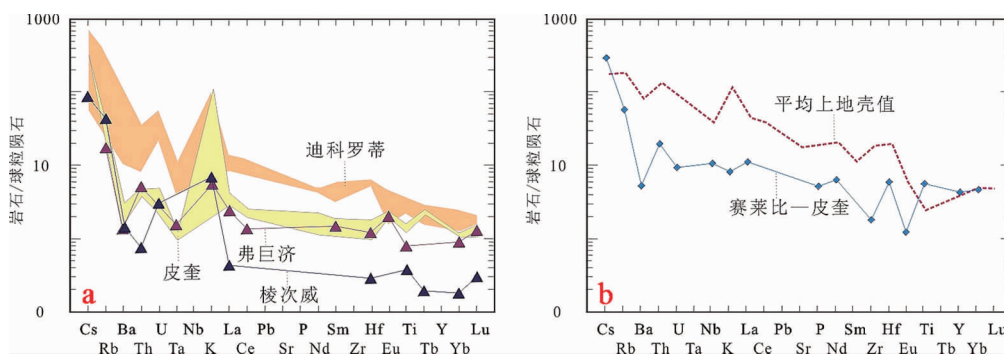
图5 赛莱比-皮奎矿床微量元素地幔标准化模式^[2]

Fig. 5 Primitive mantle-normalized pattern of trace elements of Selebi-Phikwe Cu-Ni deposit

于陆内玄武岩和上地壳平均值(上地壳含量大于10%~20%)^[11]。

3.1.2 亲铜元素

Maier等^[7]通过对矿床的研究发现,岩石中亲铜金属元素与硫含量呈正比,说明在岩石结晶过程中或后期金属元素和硫的运移均受到限制,其与菲尼克斯和塔克旺矿床相比,赛莱比-皮奎矿床中PGE/S比值有逐渐降低的趋势^[7]。

赛莱比-皮奎矿床中块状硫化物矿石($w(S) = 20\% \sim 30\%$)比浸染状硫化物矿石的金属含量更易于变化,导致了矿床中金属和硫的相关性差^[7]。在许多矿床中,浸染状硫化物矿石比块状硫化物矿石更富集金属元素。特别是浸染状硫化物矿石相对富集Cu元素,导致Cu/Ni比值较高,也富集Pt,具有较高的Pt/Pd。

在Ir至Cu的金属富集方面,Barnes等^[25]发现浸染状硫化物矿石特征与侵入体辉长岩特征相似。Maier等^[7]研究发现赛莱比-皮奎样品的 $(Cu/Pd)_N > 1$,表明该矿体中的硫化物是从PGE耗尽以后的岩浆分离出来的,研究还发现矿床中由于Au的运移原因,常呈现出负异常特征。

3.1.3 岩石化学

Maier等^[7]通过对赛莱比-皮奎矿集区内的辉长苏长岩、辉岩和橄榄岩中MgO组分进行测试,其 $w(MgO) = 6\% \sim 29\%$,多数样品的 $w(Al_2O_3) = 15\% \sim 22\%$,因此认为这些样品含有50%~75%的斜长石,并且促使其形成中浅色辉长苏长岩。根据Wakefield^[9]对赛莱比-皮奎铜镍矿床含矿岩体的全岩分析数据,岩石化学投图(图6)显示,赛莱比-皮奎铜镍矿床含矿岩体具有弱碱质-碱质、铝质-高铝质的特点,属于铁镁质-铁质区岩石。在Jensen^[26]的CaO—MgO— Al_2O_3 图解中,赛莱比-皮奎铜镍矿

床含矿岩体基本落入玄武岩质科马提岩区的范围。

3.2 稳定同位素

通过对赛莱比-皮奎矿集区中硫同位素和铁同位素的研究,可以分析其同位素的来源问题,从而有助于我们对矿床成因的研究。

3.2.1 硫同位素

Marco等^[27]研究赛莱比-皮奎矿集区中 $\delta(^{34}S) = -3.1 \times 10^{-3} \sim 0.3 \times 10^{-3}$,变化区间较小可能是受到幔源硫体($\Delta(^{33}S) = -0.89 \times 10^{-3} \sim -0.27 \times 10^{-3}$)的影响,进而硫化物呈现出明显的负 $\Delta(^{33}S)$ 异常,也有壳源流体的加入(图7)。Ripley等^[28]指出,脱气与低压侵位和喷出有关,也改变了岩浆的氧化还原环境,进而影响溶解的硫化物和硫酸盐的比例,成为镁铁质岩浆中硫同位素变化的重要因素。负 $\Delta(^{33}S)$ 异常说明硫可能与块状硫化物透镜体发生同化混染作用,发生贫化或者是矿化,这可能与长英质岩石或具有早期成岩黄铁矿结核的黑色页岩有关^[27]。

3.2.2 铁同位素

Marco等^[27]研究赛莱比-皮奎矿集区中的铁同位素特征,其结果显示为一个负异常值($-0.61 \times 10^{-3} \sim -0.04 \times 10^{-3}$),超出高温岩浆分异值($+0.2 \times 10^{-3} \sim -0.3 \times 10^{-3}$)^[30],矿集区中的铁同位素值是与富含有机质页岩中的热液硫化物矿床或者黄铁矿结核的铁元素同化作用一致,其也通常显示负 $\delta(^{56}Fe)$ 值^[30]。

3.3 成因模式

就世界范围内的超大型铜镍硫化物矿床而言,深大断裂及其诱发的次级断裂控制着含矿岩体的形态和产状,并在一定程度上制约着矿床的热液叠加、后期改造及再富集作用^[31-33]。研究表明,已发现的超大型铜镍硫化物矿床普遍存在多期次岩浆活动,

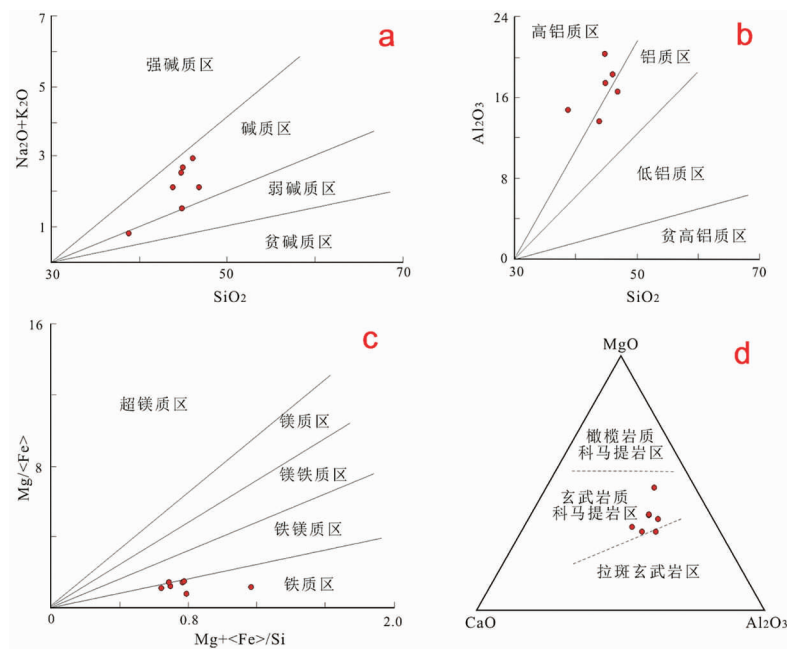


图 6 赛莱比-皮奎铜镍矿床含矿岩体岩石化学成分图解

Fig. 6 Petrochemical composition diagram of Selebi-Phikwe Cu-Ni deposit

a. $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ 变异图解; b. $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 变异图解; c. $\text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Si}) - (\text{Mg} + \text{Fe})/\text{Si}$ 变异图解; d. $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(岩区界线据文献[26])

而这些岩浆活动基本上都与控制岩体的深大断裂的多期次活动密切相关,有人称之为同生构造多级控制^[33]。前人已对超大型铜镍硫化物矿床做了大量开发和研究工作,并普遍认为它们是硫化物从岩浆硫化物-硅酸盐熔体中熔离,并富集亲铜元素的结果^[31,34]。

Maier 等^[7]对赛莱比-皮奎矿集区中样品的稀土特征、微量常量元素、亲铜元素及岩石化学特征进行了研究,认为样品的成矿物质来源复杂,既有幔源物质来源,又有类似于陆内玄武岩特征及上地壳岩石来源,并且矿体中的硫化物是从 PGE 耗尽以后的

岩浆分离出来。Marco 等^[27]通过对赛莱比-皮奎矿集区中硫及铁同位素进行研究,再次印证了 Maier 等^[7]的说法。

李文渊^[35]认为,赛莱比-皮奎矿床产于南非陆块的前寒武纪活动带中,形成于太古宙,岩石类型属于镁铁-超镁铁质侵入体;尽管硫同位素 $\delta(^{34}\text{S})$ 值变化很小,接近于零,具有幔源岩浆硫特点,但地壳中硅的加入可能使岩浆中已有的硫发生过饱和,从而出现大规模的硫化物液相不混溶成矿。目前岩浆混合作用也被认为是导致岩浆中已有的硫发生过饱和和作用的重要因素。

上述资料显示,赛莱比-皮奎矿集区中的铜镍矿床经历了以下演化阶段:①地幔熔融分异出大量基性-超基性岩浆;②2 000 Ma 左右在构造作用影响下侵入到上地壳深度,并且中途与地壳围岩发生同化混染作用,同时大量的含硫地壳流体进入岩浆,与岩浆中的 Cu, Ni 等发生反应;③产生铜镍硫化物的堆积体进而形成矿床;④硫化物矿体受到后期强烈的褶皱和剪切作用的影响,薄层状矿体呈现香肠状透镜体,褶皱的转折端矿体有加厚的特点。

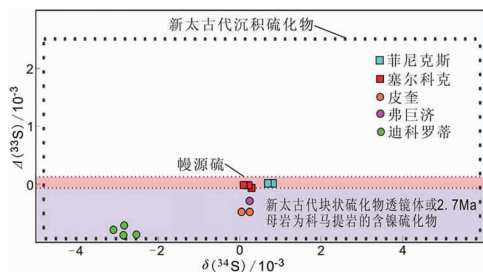


图 7 赛莱比-皮奎矿集区中 $\delta(^{34}\text{S}) - \Delta(^{33}\text{S})$ 图解^[28]

Fig. 7 $\delta^{34}\text{S}$ vs $\Delta^{33}\text{S}$ plot for the Selebi-Phikwe Cu-Ni deposit-clustered area

4 找矿模型

4.1 找矿勘查技术方法

4.1.1 地质填图

博茨瓦纳东部的马奇塔马(Matsitama)地区的铜镍矿床是通过地质填图发现的。赛莱比-皮奎铜镍矿床的含矿地层是含有各种硫化物(如磁黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿和磁铁矿)的角闪岩,相邻层位及其周围地层则以片麻岩为主,矿床形成于大型构造带中,后期受到褶皱及剪切作用的影响明显。

4.1.2 地球化学

赛莱比-皮奎铜镍矿床中的赛莱比矿体是1963年由巴芒瓦图特许有限公司运用区域土壤化探的方法发现的,并于1966年再次发现了皮奎矿体,之后又发现了若干个有很大经济价值的矿体。

4.1.3 生物地球化学

Bonang 等^[36]对博茨瓦纳东部弗朗西斯敦地区的 *H. Caudolleanum* 和 *B. diversispina* 两种植物的生物地球化学特征进行了分析,经过与土壤样品中铜镍元素分布特征的对比,查明了这两种植物有不同的金属的吸收和搬运机制,认为 *H. Caudolleanum* 可用于铜镍的指示植物。

4.2 找矿经验与教训

2011年以后,巴芒瓦图特许有限公司为了进一步扩大资源量,在矿区外围继续开展工作,从已公开的资料来看,这段时间的找矿效果还未见重大突破。早期博茨瓦纳东部运用地质填图和化探方法就可以找到矿体,然而现在的找矿工作再不是单一方法的应用,多为地物化遥等多种方法的综合运用。

5 结论

产于林波波带中带的赛莱比-皮奎铜镍矿床具有以下特征:

(1)通过对该铜镍矿床中的稀土元素、微量常量元素、亲铜元素及岩石化学特征研究,认为该矿床中的基性-超基性侵入体来源于地幔物质,并且相对富集轻稀土元素和 Th 元素,在后期向上运移时可能与地壳岩石发生同化混染作用。

(2)矿床中硫的来源多样,地壳中含硫组分的流体加入是形成铜镍硫化物矿床的重要条件。在块状

硫化物矿体中金属元素与硫元素的相关性较差,然而在浸染状矿体中 Cu 和 Pt 富集且相对亏损 PGE 等元素,这表明矿体的结晶分异作用形成于富 Cu 亏损 PGE 的岩浆。

(3)矿床经历硫化物堆积形成铜镍矿床后,矿体遭受了后期强烈的褶皱和剪切作用,进而薄层状矿体呈香肠状透镜体,褶皱的转折端矿体有加厚的特征。

参考文献:

- [1] 刘晓阳,王杰,任军平,等. 坦桑尼亚主要成矿区(带)的划分[J]. 矿床地质,2012,31(增刊):1151-1152.
- [2] 刘晓阳,王杰,骆庆君,等. 中南部非洲重要成矿带成矿规律研究与资源潜力分析项目成果报告[R]. 天津:中国地质调查局天津地质调查中心,2013.
- [3] 任军平,许康康,相振群,等. 南非维特沃特斯兰德盆地绍斯迪普金矿床地质特征、成矿模式和找矿模型[J]. 地质通报,2015,34(6):1217-1226.
- [4] 任军平,王杰,刘晓阳,等. 非洲中南部卢弗里安弧 Cu-Co 矿床研究进展[J]. 地质科技情报,2013,32(5):142-152.
- [5] 王杰,任军平,许康康,等. 南非主要金矿集区研究现状及存在问题[J]. 地质论评,2014,60(4):1-12.
- [6] 王杰,任军平,刘晓阳,等. 南非维特沃特斯兰德德里霍特恩(Driefontein)超大型金矿床[J]. 矿床地质,2013,32(6):1308-1311.
- [7] Maier W D, Barnes S J, Chinyepi G, et al. The composition of magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in the Tati and Selebi-Phikwe belts of eastern Botswana[J]. Miner Deposita, 2008, 43: 37-60.
- [8] Brown P J. Petrogenesis of Ni-Cu ore bodies, their host rocks and country rocks at Selebi-Phikwe, eastern Botswana. Ph. D. thesis, University of Southampton, UK, 1988: 333.
- [9] Wakefield J. The structural and metamorphic evolution of the Phikwe Ni-Cu sulfide deposit, Selebi-Phikwe, eastern Botswana[J]. Econ. Geol., 1976, 71: 988-1005.
- [10] Mason R. The geology of the Baines Drift area: Botswana Geol. Survey Rept. The geology of the country between Francistown and Madinare(Unpub. Ph. D. thesis)[D]. Witwatersrand University, 1967-1971.
- [11] Hor A K, Hutt D K, Smith J V, et al. Petrochemistry and mineralogy of early Precambrian anorthositic rocks of the Limpopo belt, southern Africa[J]. Lithos., 1975, 8: 297-310.
- [12] Barton J M, Klemd R, Zeh A. The Limpopo Belt: a result of Archean to Proterozoic, Turkeic-type orogenesis? [M]//Reimold W U, Gibson R L. Processes on the Early Earth. Geological Society of America Special Paper 405, 2006: 315-332.
- [13] Van Breemen O, Dodson M H. Metamorphic chronology of the Limpopo belt, southern Africa[J]. Geol. Soc. America

- Bull., 1972, 83: 2005–2018.
- [14] Hickman M H, Wakefield J. Tectonic implications of new geochronologic data from the Limpopo belt at Pikwe, Botswana, southern Africa; Geol. Soc. America Bull., 1975, 86: 1468–1472.
- [15] Baldock J W, Hepworth J V, Marengwa B S. Gold, Base Metals, and Diamonds in Botswana[J]. Economic Geology, 1976, 71: 139–156.
- [16] Lear P A. The ore mineralogy of the Phikwe and Selebi nickel-copper deposits, Botswana. Geological Society of South Africa[J]. Special Publication, 1979, 5: 117–132
- [17] Johnson R S. The Phoenix and Selkirk nickel-copper sulphide ore deposits, Tati Greenstone Belt, eastern Botswana[M]// Anhaeusser C R, Maske S. Mineral deposits of Southern Africa. Geological Society of South Africa, 1986: 243–248.
- [18] Gordon P S L. The Selebi-Pikwe nickel-copper deposits, Botswana[M]// Lister L A. Symposium on granites, gneisses and related rocks. Special Publication, Geological Society of South Africa, 1973, 3: 167–187.
- [19] Gallon M L. Structural reinterpretation of the Selebi-Phikwe nickel - copper sulphide deposits, eastern Botswana[M]// Anhaeusser C R, Maske S. Mineral deposits of Southern Africa. Geological Society of South Africa, 1986: 1663–1669.
- [20] 巴芒瓦图特有限公司网站[OL]. [2011-06-31]. <http://www.bcl.bw/assets/files/BCL%20Summary%20Resources%20&%20Reserves%20as%20at%20June%2031%202011.pdf>.
- [21] 汤中立. 超大型 Ni-Cu(Pt)岩浆矿床的划分与找矿[J]. 地质与勘探, 2002, 38(3): 1–7.
- [22] Mc Court S, Kampunzu A B, Bagai Z, et al. The crustal architecture of Archean terranes in northeastern Botswana[J]. South African Journal of Geology, 2004, 107: 147–158.
- [23] Wright L. A structural cross section across the north margin of the Limpopo Belt[D]. Ph. D. thesis, University of Leeds, UK, 1977.
- [24] Wilson M. Igneous petrogenesis[M]. Chapman and Hall, London, 1989: 466.
- [25] Barnes S J, Naldrett A J, Gorton M P. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas[J]. Chem. Geol., 1985, 53: 303–323.
- [26] Jensen L S. A New Cation Plot for Classifying Subalkalic Volcanic Rocks[R]. Ontario Geol. Surv. Miscellaneous Paper 66, 1976: 1–22.
- [27] Fiorentini M L, Bekker A, Rouxel O, et al. Multiple Sulfur and Iron Isotope Composition of Magmatic Ni-Cu-(PGE)[J]. Economic Geology, 2012, 107: 105–116.
- [28] Ripley E M, Li C. Sulfur isotope exchange and metal enrichment in the formation of magmatic Cu-Ni-(PGE) deposits [J]. Economic Geology, 2003, 98: 635–641.
- [29] Bekker A, Barley M E, Fiorentini M, et al. Atmospheric sulfur in Archean komatiite-hosted nickel deposits[J]. Science, 2009, 326: 1086–1089.
- [30] Rouxel O, Shanks W C, Bach W, et al. Integrated Fe-and S-isotope study of seafloor hydrothermal vents at East Pacific rise 9°–10° N[J]. Chemical Geology, 2008, 252: 214–227.
- [31] 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.
- [32] 杜乐天. 地壳流体与地幔流体间的关系[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 72–180.
- [33] 翟裕生, 邓军, 宋鸿林, 等. 同生断层对层控超大型矿床的控制[J]. 中国科学: D 辑, 1998, 28(3): 214–218.
- [34] Naldrett A J. Key factor in the genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey's Bay and other World-class Ni-Cu-PGE deposits: implications for exploration[J]. Australian Journal of Earth Science, 1997, 44: 283–315.
- [35] 李文渊. 岩浆 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床研究现状及发展趋势[J]. 西北地质, 2007, 40(2): 1–28.
- [36] Bonang B M N, Gerald M. Wibetoe S G, et al. Identification of Cu and Ni indicator plants from mineralised locations in Botswana[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2005, 86: 130–142.

Progresses of research on the Selebi-Phikwe Cu-Ni sulphide deposit in Botswana

REN Junping, XU Kangkang, LIU Xiaoyang, WANG Jie,

ZUO Libo, SUN Kai, HE Shengfei, HE Fuqing

(Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin, 300170, China)

Abstract: The paper summarizes result of the previous researches on Cu-Ni deposits in Botswana including the regional geological background of Selebi-Phikwe Cu-Ni deposit, stratigraphic division, systematic analysis of geological characteristics and genesis of the deposit. The authors think that ore material of the deposit is derived from multi-sources and it is exposed to strong post-ore folding and shearing.

Key Words: Cu-Ni sulphide deposit; Geological characteristics; Limpopo metamorphic belt; Selebi-Phikwe; Botswana