



# 南非帕拉博鲁瓦超大型氧化铁型铜(金)矿床\*

张伟波<sup>1,2</sup> 聂凤军<sup>2</sup> 曹毅<sup>2</sup> 王丰翔<sup>3</sup>

(1 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 3 石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031)

帕拉博鲁瓦铜(金)矿床(Phalabowra, 以下简称帕瓦), 位于南非德兰士瓦东北部的帕拉博鲁瓦城附近, 中心地理坐标为东经 34°08', 南纬 23°59', 是南非最主要的铜生产基地。该矿山于 1956 年正式投产, 目前由力拓(Rio Tinto)和英美资源(Anglo American)共同拥有。地质勘探结果表明, 帕瓦矿床铜和金的储量为 425 万吨(Sillitoe 2002)。除产铜、铁、和蛭石之外, 帕瓦矿山的金、银、铀、镍、铂族和稀土元素亦可作为伴生组分回收。在过去的近 50 年间, 帕瓦

矿山铜精粉总产量超过 450 万吨。自 2006 年起, 帕瓦矿山转入地下开采, 矿山寿命可达 20 年。

## 1 产出环境

帕瓦铜(金)矿床在早前寒武纪克拉通块体内产出, 与帕瓦火成杂岩体具有密切的时空分布关系。含矿岩体位于南非太古宙卡普瓦尔(Kaapvaal)克拉通的东北部边缘附近(图 1), 形成时代为 2060 Ma, 属

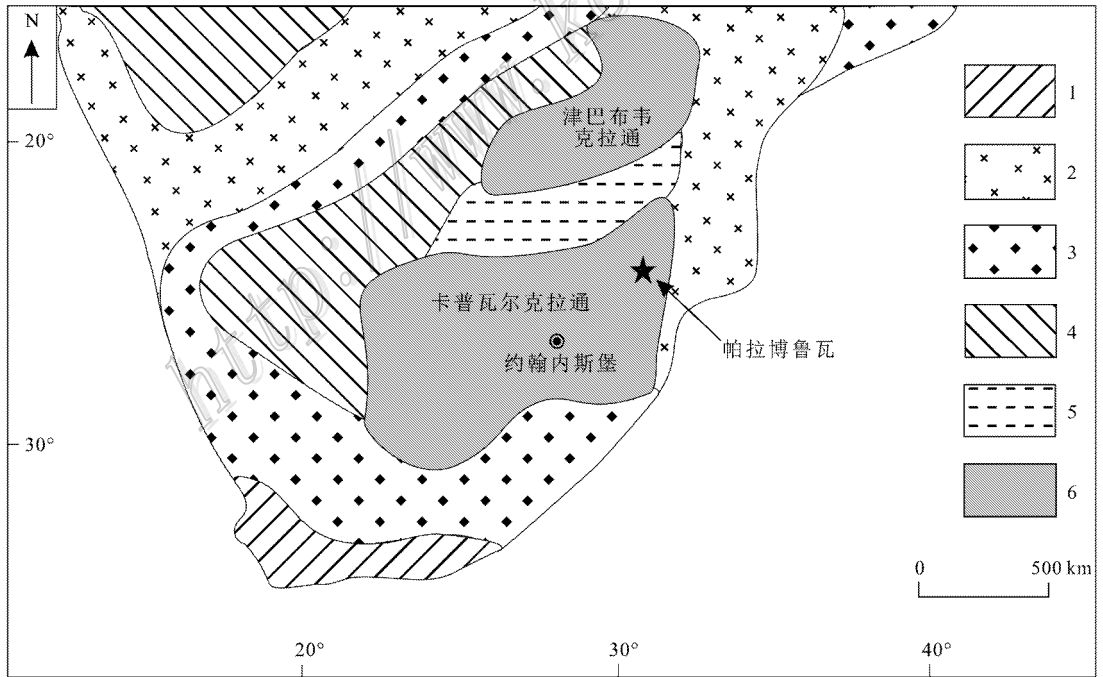


图 1 非洲南部构造简图(据 Groves et al., 2001)

1—开普敦造山带(250 Ma); 2—泛非带(650~400 Ma); 3—基巴拉带(1300~1000 Ma); 4—乌本汀带(2200~1800 Ma); 5—林波波带(大于 2000 Ma); 6—太古代克拉通(大于 2500 Ma)

\* 本研究得到国家重点自然科学基金项目(编号: 41030421)和地质调查项目(编号: 1212010811029)资助

第一作者简介 张伟波, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: zhangwb2007@163.com

\*\* 通讯作者 聂凤军, 男, 1956 年生, 研究员, 博士生导师, 从事金属矿床地质和地球化学研究。Email: nfj@cei.gov.cn

古元古宙构造-岩浆活动的产物(Groves et al., 2001)。

帕瓦杂岩体在一个巨大的花岗岩基中呈不规则椭圆状产出,南北长 6.5 km,东西宽 2~3 km(图 2A)。有数据表明,该杂岩体深部为呈倾斜状产出的岩管,倾角 73~80°,向地下延伸 5 km 左右(Badreddine et al., 2000)。该杂岩体是一个由云母辉石岩、碳酸岩、正长岩和超基性伟晶岩组成的镁质岩块体。根据各岩相带空间分布关系,云母辉石岩最先侵入,并且与太古代片麻岩围岩发生作用,形成了长石辉石岩。正长岩侵入到云母辉石岩体周围的片麻岩中,随后在杂岩体的南部、中部和北部分别形成了 3 处不规则超基性伟晶岩管,分别呈主岩管和支岩管形式产出(Badreddine et al., 2000)(图 2A)。在杂岩

体形成的后期阶段,杂磷灰白云岩(Foskorite,白鸽等,1985译为磁铁磷灰橄榄岩)和碳酸岩侵入到伟晶岩体的中心部位(PMCS,1976)。

## 2 矿床地质

勒柯普(Loolekop)超镁铁质块体是含矿火山岩管的两个支岩管之一,为帕瓦矿床的主要组成部分。勒柯普杂岩体为一个地表呈椭圆形的垂直侵入岩体,东西长 1400 m,南北长 800 m,在地表上形成一个海拔 478 m 的山岭。岩体主要由辉石-橄榄石-金云母伟晶岩、橄榄石-金云母伟晶岩、杂磷灰白云岩、辉石岩、正长岩、长霓岩和碳酸岩组成,其中前 3 种统称超镁铁质岩。需要指出的是碳酸岩与铜(金)矿

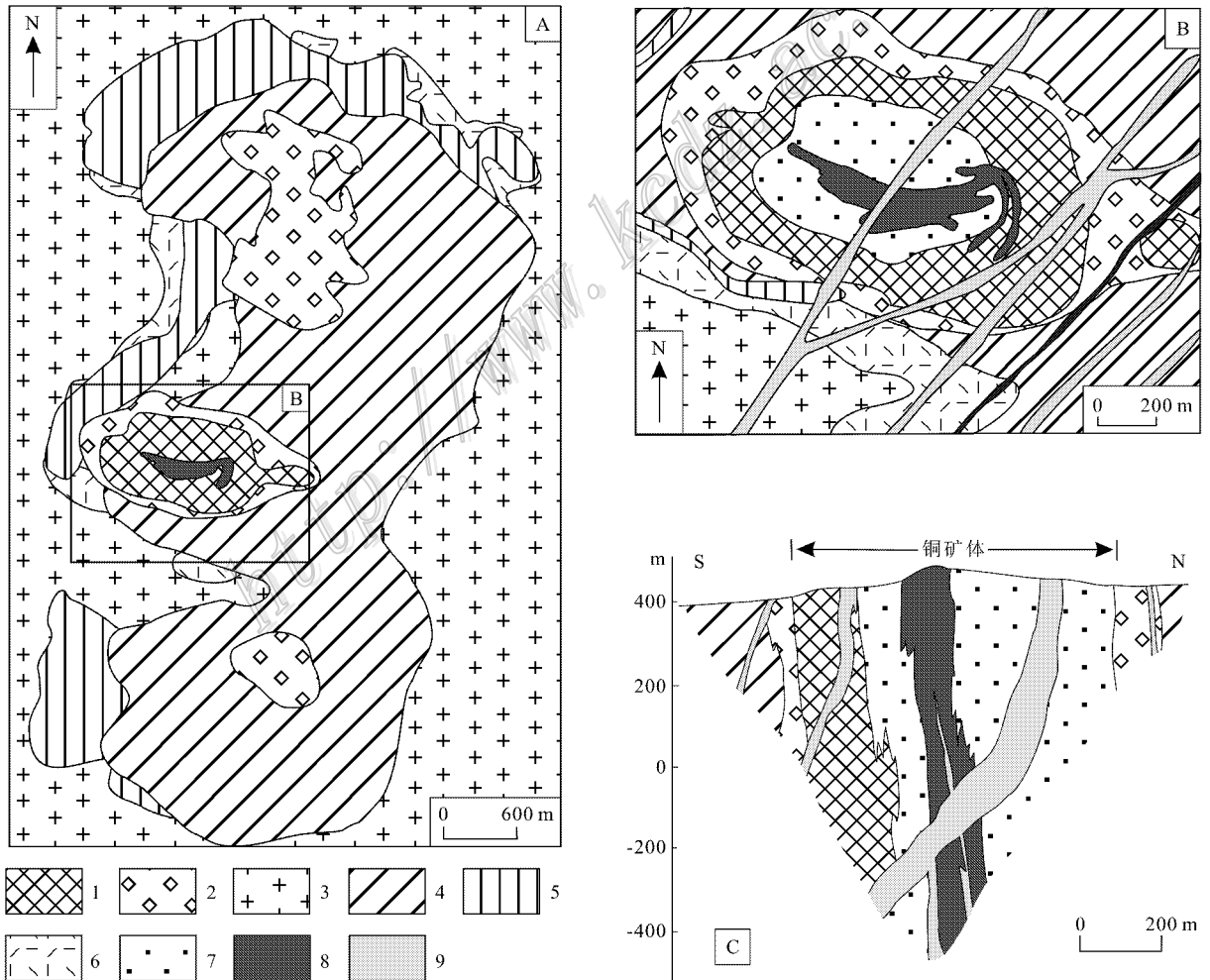


图 2 帕拉博鲁瓦杂岩体地质图(A)勒柯普矿体地质平面图(B)(据 Groves et al., 2001)及剖面图(C)(据 PMCS,1976)  
1—杂磷灰白云岩;2—辉石伟晶岩;3—花岗岩片麻岩;4—云母辉石岩;5—长石辉石岩;6—正长岩;7—早期碳酸岩;8—晚期碳酸岩;  
9—辉绿岩脉

床具有密切的时空分布关系,其中碳酸岩可以进一步划分为早期带状碳酸岩和晚期脉状碳酸岩。根据岩体(脉)的穿插关系,杂岩体内各种岩石形成的先后顺序依次为:辉石质似伟晶岩,辉石岩,杂磷灰白云岩,正长岩,早期和晚期碳酸岩。另外,一系列北东走向的平行直立辉绿岩墙切割破坏了杂岩体(图2B)。杂岩体内的早期碳酸岩以2种形式产出,一种为椭圆形的直立岩颈,位于杂磷灰白云岩中心,另一种为直立的弧形岩墙,岩墙之间夹杂磷灰白云岩和辉石岩。岩石为白色中粗粒,具有明显的直立纹理或陡倾斜纹理,与外侧杂磷灰白云岩中的纹理平行。岩石中的碳酸盐矿物和磁铁矿颗粒呈线状平行排列,使岩石具纹理或层理构造。主要由方解石和磁铁矿组成,少量矿物有呈橄榄石假象的蛇纹石、褐色粒硅镁石、磷灰石和白云石。磁铁矿颗粒直径可达到20~30 cm。见有宽6 m、长约600 m的早期碳酸岩岩墙切过似伟晶岩和辉石岩。这种碳酸岩岩墙有中细粒白色到橙红色的方解石及少量磷灰石、霓石、榍石组成(白鸽等,1985)。晚期碳酸岩呈岩墙产出,一组走向为NW 70°,另一组走向为NE 70°。岩石主要有方解石和白云石组成。此外,还可见到磁铁矿和萤石。铜矿化不仅出现在碳酸岩中,也出现在杂磷灰白云岩中。含铜矿体为面积约600×1200 m<sup>2</sup>,呈椭圆形直立管状体,正好位于两组晚期碳酸岩脉的交叉处。矿体向下延伸相当稳定,在900 m深度以内,厚度无明显变化(图2C),矿石品位也未见降低(白鸽等,1985)。铜和铁矿化大多呈脉状、网脉状和浸染状产出,并且构成似层状、脉状、条带状和透镜体状块体等形态。主要含铜矿物为黄铜矿,其次为斑铜矿、辉铜矿、墨铜矿、方黄铜矿和黝铜矿等,其他金属矿物有磁铁矿、镍黄铁矿、针镍矿、方硫铁镍矿、辉钴矿、紫硫镍矿、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿、金、银、铂族元素矿物等(Heinrich,1970)。脉石矿物有方解石、白云石、霓石、萤石、蛇纹石等。另外,帕瓦矿床除产出有大量磁铁矿和含铜硫化物外,含磷、铀和稀土元素矿物分布广泛(方钍石和斜锆石)受上述矿物不均匀分布影响,矿体不同部位矿石样品中铀、钍和REE含量变化幅度较大(Groves et al.,2001)。

### 3 矿床成因

帕瓦矿床与碳酸岩具有密切的时空分布关系,

是深源岩浆活动的产物。在全球已发现的众多碳酸岩体中,唯独帕瓦地区碳酸岩体产出具有工业价值的铜矿体,是一种奇特的地质现象。部分学者认为,帕瓦矿床的产出环境和地质特征与典型的氧化铁型铜(金)矿床(IOC G)十分相似,是构造-岩浆活动的产物(Groves et al.,2001),一般来讲,IOC G矿床的形成作用与深大断裂多次活动和大规模岩浆作用有关,帕瓦矿床位于太古宙克拉通边缘深大断裂旁侧,与碱性杂岩体具有密切成因联系。初步研究结果表明,受岩石圈地幔交代作用影响,富含挥发性组分的碱性熔浆可沿构造薄弱部位向地壳上部运移,并且与围岩发生强烈水-岩反应,形成大面积分布的热液蚀变带。碳酸岩和超镁铁质侵入岩所构成的大规模岩管是勒柯普矿体的主要容矿围岩,并且发育有钠化(钠长石、方柱石)和钾化(钾长石、绢云母)蚀变带。矿体与碱性岩独特的空间分布关系进一步印证了它们是深源岩浆活动的产物。

在碱性岩体的晚期碳酸岩内部,网状含矿细脉十分发育,其空间分布特点表明,他们是多期次岩浆热液活动的产物。多期次构造压碎作用产生一系列网脉状破碎带,进而为成矿流体上涌和含矿物质聚集创造了有利空间条件(PMCS,1976)。成矿流体在沿破碎带运移过程中,水-岩反应导致大量含铜硫化物沉淀,并且在细微破碎带形成一系列含铜(金)矿脉。一般情况下,这些脉体的长度不超过1 m,宽度不超过1 cm。尽管单个脉体在走向上不存在明显的规律性特点,但是岩体上受构造破碎带控制。一般情况下,矿体的中心部位以富含铜硫化物为特征,边缘磁铁矿含量明显增加。黄铜矿主要出现在杂岩体边缘的杂磷灰白云岩和碳酸岩中。尽管铁氧化物(以磁铁矿为主)出现在杂岩体的周缘,但是其形成时间明显晚于铜硫化物(PMCS,1976)。

### 4 找矿模型

前人的大量研究结果表明,帕瓦矿床是一处与中元古宙火成碳酸岩具有密切成因联系的铜-金-铁-稀土元素-磷矿床,其产出环境与中国白云鄂博铁-钪-稀土元素矿床相似,属氧化铁型铜-金矿床(聂凤军等,2008)。该矿床的找矿标志大体可归纳如下:

(1) 产出环境为太古宙克拉通边缘,与深大断裂具有密切的时空分布关系;

(2) 容矿围岩为云母辉石岩-碳酸岩;

(3) 碱性交代蚀变作用非常发育,主要表现为钠化(钠长石、方柱石)和钾化(钾长石、绢云母);

(4) 矿物组合为磁铁矿-黄铜矿-斑铜矿-黄铁矿-磷灰石和金-银矿物;

(5) 元素组合为 Cu-REE-P-F-Fe-U-Th 以及少量的 PGE;

(6) 在近乎直立的碳酸岩管内产出,形成同心环状的矿化分带现象。

## 5 初步认识

(1) 帕瓦铜金矿床在太古宙克拉通边缘产出,并且与深大断裂具有密切空间分布关系;铜金矿化主要在中元古宙碳酸岩-云母辉石岩内产出,并且受构造破碎带控制。

(2) 帕瓦铜金矿床的产出环境与中国的白云鄂博铁-铌-稀土元素矿床相似,其找矿勘查模型可以用于华北克拉通周缘碳酸岩发育区的找矿工作。

(3) 无论从阐述环境和地质特征上,还是矿物成分、热液蚀变和形成作用上来看,帕瓦矿床与典型的 IOCG 矿床存在有许多相似之处,是中元古宙古

大陆伸展环境内构造-岩浆活动产物。

### 参考文献/References

- 白 鸽,袁忠信. 1985. 碳酸岩地质及其矿产[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所刊. 第1号(总第13号) 68-70.
- 聂凤军,江思宏,路彦明. 2008. 氧化铁型铜-金(IOCG)矿床的地质特征、成因机理与找矿模型[J]. 中国地质, 35(6):1074-1087.
- Badreddine R, Grandjean F, Vandormael D, Fransolet A M and Long G J. 2000. An  $^{57}\text{Fe}$  Mossbauer spectral study of vermiculitization in the Palabora Complex, Republic of South Africa[J]. Clay Minerals, 35: 653-663.
- Groves D I and Vielreicher N M. 2001. The Phalabowra (Palabora) carbonatite-hosted magnetite-copper sulfide deposit, South Africa: An end-member of the iron-oxide copper-gold-rare earth element deposit group? [J]. Mineralium Deposita, 36: 189-194.
- Heinrich E W. 1970. The Palabora carbonatitic complex: A unique copper deposit[J]. Can Mineral. 10: 585-598.
- Palabora Mining Company Limited Mine Geological and Mineralogical Staff. 1976. The geology and economic deposits of copper, iron, and vermiculite in the Palabora Igneous Complex: a brief review[J]. Economic Geology, 71: 177-192.
- Silltoe R H. 2002. Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration[J]. Mineralium Deposita, 37: 4-13.