

南非矿山考察简况

陈毓川 沈保丰 蔡文彦 朱明玉 其和日格

应南非地质科学委员会(前地质调查局)N·弗里克局长的邀请,陈毓川院长率地科院代表团于1995年1月18日—27日访问了南非共和国。

南非地质科学委员会非常重视中国代表团的访问,接待热情,友好,日程安排极为周到,尽可能多地给代表团安排业务考察和交流。在短短的十天里,代表团访问了地质科学委员会,参观了其所属各业务室及其位于开普敦地区的分支机构,维特瓦德斯兰德大学地质系和开普敦大学地质系,以及矿物冶金技术委员会(MINTEK);代表团还参观了世界著名的曾产出Culliana大钻石的Premier金刚石矿,Driefortein金矿,Agnes金矿和Impala铂矿,下了矿井,听了关于地质情况和开采工作的介绍,参观了开采工作面,受到这些矿山公司的热情接待。代表团还驱车横穿世界著名的产出许多金、镍、铜、锡、铁、铬、铂及萤石等矿产的布什维尔德火成杂岩体。本文主要介绍考察矿山的地质情况。

1 金 矿

南非是世界上最大的黄金生产国,从1886年在约翰内斯堡附近发现维特瓦德斯兰德型金—铀砾岩矿床以后,到1993年已累计产金45610吨。这产量大致相当于二十世纪世界黄金产量的40%,也是世界采金历史中总产量的30%。现在南非已探明储量有2万多吨,占世界总储量的40%。黄金产量一直保持在600吨左右,其中1970年曾超过1000吨,1984年为683吨。1992年的产量为614.1吨,1993年为619.5吨,分别占世界总产量的27.41%和27.16%。1994年产量为583.9吨,比1993年下降5.7%,是最近三十年来产量最低的一年。南非不仅是世界上黄金最大的生产国,同时也是世界上黄金最大的出口国,黄金占南非出口总收入的30%左右。南非在世界黄金行业中占突出重要的位置,有四个世界第一,即储量最大(2万多吨)、产量最大(年产平均约600吨)、开采深度最深(达4000米、远西兰德矿田)、具最大金矿产量的矿山(Freegold矿山,年产黄金100—110吨,超过乌兹别克斯坦的穆龙套金矿,该矿年产估计为80吨)。南非黄金生产开始主要由五大财团所垄断,即兰德矿山公司(Rand Mines)、南非金田公司(Gold Field of South Africa)、约翰内斯堡联合投资公司(Johannesburg Consolidated Investment)、通用采矿与金融公司(General Mining and Finance Corporation)和联合公司(Union Corporation),1890年以后又有两个财团进入,即英美公司(Anglo-

American, 成立于1917年)和盎格鲁瓦尔联合投资公司 (Anglo-Vaal Consolidated Investment, 成立于1933年)。但由于采金业的巨额利润, 荷兰人开始向南非采金业投资, 在1963年和70年代中期先后控制了通用采矿与金融公司和联合公司, 并成立了一个新的集团即金科集团 (Gencor), 因而目前南非黄金生产主要由6个财团控制。英美公司、金田公司和金科集团控制了28个大型金矿, 其余8个大矿分别为其他三个财团控制。英美公司是最大的财团, 他直接控制9个金矿, 生产40%以上的南非黄金。南非金田公司是南非第二大采金财团, 属于这个公司的有7个金矿, 其中占有重要位置的是 Drifontein 金矿。金科集团一共控制了11个矿山和2个正在开发的矿山, 是80年代南非采金工业的主要力量。兰德矿山公司现称巴罗兰德 (Barlow Rand), 年产黄金约30吨, 控制了4个大矿。盎格鲁瓦尔公司控制了2个大矿。据1994年世界黄金年鉴, 1993年世界15个主要黄金公司黄金产量占世界总产量比例达52.8% (不含前苏联和中国)。前15个公司中, 南非有6家, 且前三名均为南非, 主要公司的名称、排序和1993年产量为: 英美公司(1) (指排列序号、下同), 283吨; 金田公司(2)、122吨; 金科公司(3)、70吨; 约翰斯堡联合投资公司(6)、54吨; 盎格鲁瓦尔公司(10)、42吨; 兰德矿山公司(11)、42吨。

南非金矿类型主要是维特瓦德斯兰德型金铀砾岩矿床 (简称兰德型), 是当前南非最重要的矿床类型, 也是主要的开采对象; 其次是在太古宙绿岩带中的细脉浸染型的脉型金矿。这次我们分别考察了兰德型的 West Driefontein 金矿和绿岩带的 Agnes 金矿。

1.1 绿岩带金矿

南非绿岩带金矿分布在卡普瓦尔 (Kaapvaal) 克拉通内的巴伯顿 (Barberton)、穆奇森 (Murchison)、彼德斯堡 (Pietersburg) 和萨瑟兰 (Sutherland) 绿岩带内, 其中以巴伯顿绿岩带金矿的数量和规模最大, 其次是穆奇森绿岩带。

在巴伯顿绿岩带中约有350金矿床, 年产量3110kg, 但是70%的金产量来自 Sheba、New Consort、Fairview 和 Agnes 矿山, 几乎85%的产量来自9个矿山 (见表1), 多数金矿产出在绿岩带的北西部分, 特别在 Jamestone 片岩带、Sheba Hills 区和 Moodies Hills 区 (见图1)。

巴伯顿绿岩带中金矿主要产在 Swaziland 超群中。Swaziland 超群, 自下而上可分三个群, 即 Onverwacht 群、Fig Tree 群和 Moodies 群。整个地层厚度大于20km, 其中 Onverwacht 群最为重要, 厚度大于15km。Onverwacht 群主要由镁铁质—超镁铁质火山岩和少量长英质火山岩组成。可分六个组, 下部三个组统称为下超镁铁质单位, 其特征是广泛分布科马提岩和拉斑玄武岩, 并夹有少量铁建造, 火山岩岩序厚达8—9km。上部三个组是钙碱性火山岩系, 主要由镁铁质火山岩到长英质火山岩, 并夹有燧石和铁建造, 科马提岩很少, 厚度约7—8km。Fig Tree 群主要是泥质单元, 厚度约2km, 由页岩、硬砂岩、燧石、铁建造和粗粒陆源碎屑岩组成, 次要的有集块岩、凝灰岩和英安质熔岩, 不整合产在 Onverwacht 群上。Moodies 群是砂质沉积岩, 厚度3.5—5km, 主要岩类有砾岩、石英岩、硬砂岩、砂岩, 次要岩类有铁建造、燧石和镁铁质火山岩。

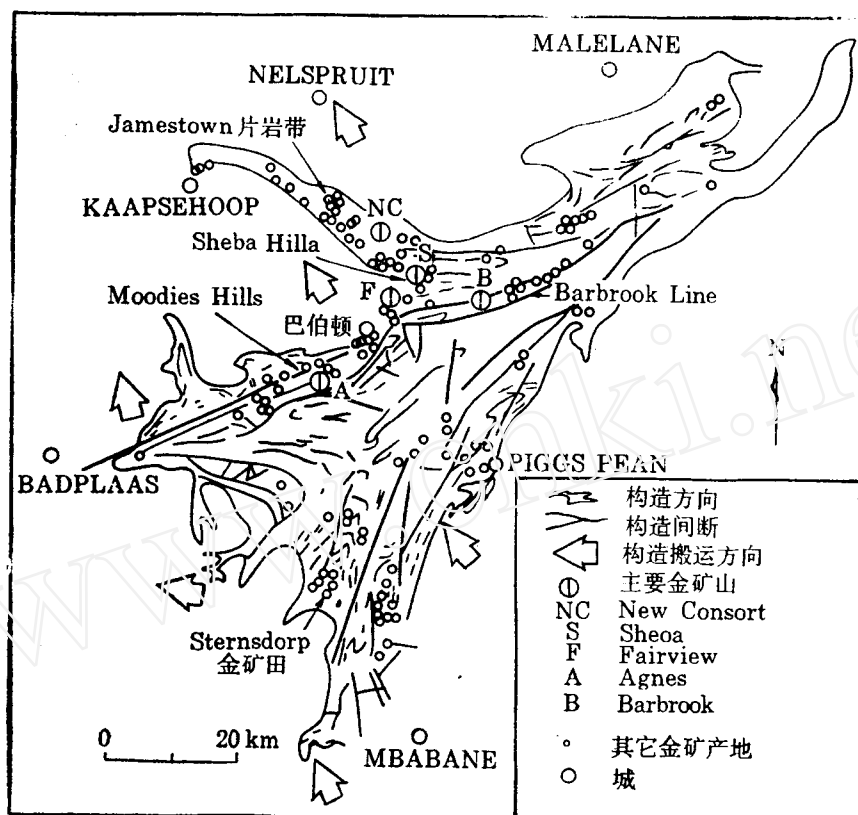


图1 巴伯顿绿岩带中主要金矿的分布示意图

该群呈假整合到不整合产在 Fig Tree 群上。Swaziland 超群形成的同位素年龄为32—36亿年。

Agnes 金矿地质特征

Agnes 金矿位于巴伯顿绿岩带的西南端 Moodies Hills 中 (图1)。金矿山属于ETC公司经营, 该公司管理 Agnes、Sheba 和 New Consort 三个矿山。Agnes 金矿已开采了100多年, 共有三个小矿山, 每月产量约14000吨矿石, 品位3—5 g/t。品位在3.2 g/t以下的矿石由于经济不合算, 目前不开采。金矿工作人员约420人, 其中井下300人, 地质人员仅2人, Agnes 矿从地表开采至今已达井下-750m。矿体在 Fig Tree 群内, 主要在 Onverwacht 群和 Fig Tree 群接触处的 Fig Tree 群一侧, 赋存围岩主要为黑色页岩、铁建造、燧石岩, 特别具红色的条带状碧玉质燧石岩更令人注意。围岩产状陡立。矿层产出受页岩中剪切带控制。矿区内有二条剪切带。金矿化呈细脉、网脉状产出, 与黄铁矿关系密切, 矿脉呈东西走向, 倾角达80°—85°, 西部较窄, 东部较宽。由细粒层纹状黄铁矿和黑色页岩组成的硫化物相铁建造与金矿关系十分密切, 铁建造厚的地方, 金矿化较好, 一般东部铁建造的厚度约6m, 西部1—4m。矿石为含金条纹一条带状黄铁矿,

后期见无石英脉穿切, 巴伯顿绿岩带中金矿的成矿铅模式年龄为 32 亿年 (Barton 和 Allsop, 1984; Houstoun, 1981)。在 Fairview 金矿, 对取自围岩的锆石和热液金红石获得 U-Pb 年龄为 $3126 \pm 21\text{Ma}(2\sigma)$ 和 $3064 \pm 18\text{Ma}(2\sigma)$ (De Ronde et al., 1991 a, b)。

表1 巴伯顿绿岩带中主要金矿床特征

	矿 床	已 开 采 总金产量 (kg)	围 岩	矿 化 类 型	矿 石 矿 物
1	Sheba	64899	页岩、硬砂岩 燧石、铁建造	石英脉、角砾岩和 浸染状硫化物	py、Apy、gold ±Po、cpy、gn等
2	New Consort	55017	页岩和角闪岩 间的硅化带	石英脉和浸染状硫 化物	gpId、Apy、po、 cpy
3	Fairview	49950	硬砂岩、页岩 和石英岩	剪切带中网脉、 石英脉	py、Apy、±gold、 cpy、sl、gn、stib等
4	Agnes	18788	页岩、铁建造	石英脉、含金浸染 状和条纹状黄铁矿	Gold、py、±sl、 cpy、Apy
5	Alpine	5942	石英岩、页岩	石英脉	Gold、cpy、py、 gn、tetra
6	Worcester	5757	镁铁质和超镁 铁质片岩	石英脉	Gold、py、gn、mgt
7	Fortuna	5296	白云质碳酸盐 岩、碳酸盐— 滑石—绿泥石 片岩、铁建造 等	石英脉	py、po、bn、cpy、 cu、gn、sl等
8	Pionner	4552	碳酸盐岩石、 镁铁质片岩	石英脉	Gold
9	Piggs Peak	3709	燧石、片岩绿 泥片岩、变火 山岩	燧石中的金、石英 脉、氧化矿石	Apy、py、po、cpy cobaltite

1.2 维特瓦德斯兰德型金铀砾岩矿床

这是世界上最重要的金矿类型, 也是南非金矿的主要开采对象, 该类金矿从1886年起至今已开采 4 万多吨, 现有储量 3.2 万吨, 其中证实储量 2.3 万吨。除金作为主要金属开采外尚可顺便开采银、铂族矿物、铀、金刚石和黄铁矿等。金矿区沿兰德盆地周边分布。盆地呈椭圆形, 北东向延伸 350km, 北西向宽约 300km, 面积大于 10万 km²。盆地的北部和西部受活动断裂系控制。盆地的基底为 Swaziland 超群和太古宙花岗岩组成的 Kaapvaal 克拉通, 也就是产在太古宙花岗岩—绿岩带组成的基底上。在盆地的西北部出露有 Onverwacht 群的其他岩段和 Fig Tree 群、Moodies 群的岩石, 太古宙的花岗

质岩石广泛出露在盆地的北部和中部的 Vredefort (图2)。盆地中沉积了巨厚的元古宙火山—沉积岩系, 自下而上可分为 Dominion 群、Witwatersrand (维特瓦德斯兰德) 超群和 Ventersdrop 超群。金—铀砾岩矿主要产在维特瓦德斯兰德超群。该超群的地层总厚为5500—7500m, 可划分为二个群和五个亚群, 下部为西兰德群(Westrand Group, 以前也称下维特瓦德斯兰德群), 分布在盆地的西北部边缘, 面积大于10万km², 地层厚度为2000—4000m, 主要为粗碎屑岩、细碎屑岩和火山岩组成, 火山岩和沉积岩之比为0.1:1。自下而上可分三个亚群即: Hospital Hill 亚群、Government 亚群和Jappestown 亚群。Hospital 亚群厚度900—1800m, 岩石主要为石英岩、页岩、赤铁石英岩。Government 亚群厚度1200—2000m, 主要为石英岩、含砾岩层的页岩和粗砂岩。Jappestown 亚群厚度400—1100m, 主要为粘土页岩、石英岩、砾岩透髓体和杏仁状熔岩。上部为中兰德群(Central Rand Group, 以前也称上维特瓦德斯兰德群), 该群地层最厚达3200m, 分布面积为8万km², 可分为 Johannesburg 亚群和 Turffontein 亚群。Johannesburg 亚群厚度达1500m, 主要由石英岩和砾岩组成, 是十分重要的含金铀砾岩层位, 几乎兰德盆地内的金铀砾岩矿层都产在此亚群内。Turffontein 亚群厚度约1700m, 由页岩、砾岩、石英岩和粗砂岩组成, 在该亚群内也有少量金铀砾岩矿层。但需要指出的是, 在盆地的任何地方, 维特瓦德斯兰德超群的各个段出露都不完全, 由于沉积超覆或侵蚀作用, 有时候缺失一个亚群、甚至几个亚群, 有时缺失一个群的一部分。在岩石中细粒沉积物的百分比占的比例低, 这表明沉积作用是在高能环境下产生的。在维特瓦德斯兰德超群的下部是 Dominion 群, 主要由安山岩、流纹岩和凝灰岩组成。维特瓦德斯兰德超群的上部是由安山岩、砾岩、火山碎屑岩组成的 Ventersdrop 群。最近锆石U—Pb测年表明, 位于维特瓦德斯兰德超群下部的 Dominion 群熔岩的年龄为3060Ma(Armstrong 等, 1990), 而上覆的 Ventersdrop 群火山岩的年龄为2718Ma(Armstrong 等)。这说明, 维特瓦德斯兰德超群的形成年龄在2718—3060Ma 之间。兰德盆地是一个复式向斜, 晚期褶皱为北西走向, 古老褶皱走向变化不定。

金矿床主要分布在兰德盆地东部、东北部、西部和西南部边缘。主要矿田有: Evander, East Rand、Central Rand、West Rand、Carletonville、Klerksdorp和 Welkom 7个(图2)。盆地的底部的形状影响着沉积作用。金矿田位于太古宙火山沉积岩系和花岗岩穹窿之间的下陷部分, 呈现出河积扇或扇形三角洲的形状。盆地边缘沉积物来源区多次隆起, 使沉积物重复沉积, 造成金和铀的工业富集。金主要产在5个地质位置, (但分布非常不规则): (1)砾岩的胶结物中; (2)在小侵蚀沟里与黄铁矿碎屑伴生; (3)产在不同沉积旋回之间砂层中的不整合面上; (4)产在泥层上的不整合面上; (5)产在碳质层中的不整合面上, 在碳质层里金的品位可高达5000—6000×10⁻⁶, 许多含金层在底部接触面上显著富集, 但富集程度不一。

矿石中主要有用矿物是自然金、沥青铀矿、碳铀钍矿、黄铁矿, 主要容矿岩石是富石英砾岩、砂屑岩, 而页岩和粉砂质白云岩也常有矿化。自然金的粒度多数在5—100μ, 明金少见。金粒具有不规则状, 通常在胶结物中, 有时与黄铁矿呈细脉, 自然金内有时含银。沥青铀矿颗粒一般都较小, 大致在0.1mm左右, 岩石中铀的含量较均匀, 品位为280g/t。需要指出的是, 在金—铀砾岩矿中一个很突出的特点是出现滚圆状的黄铁矿

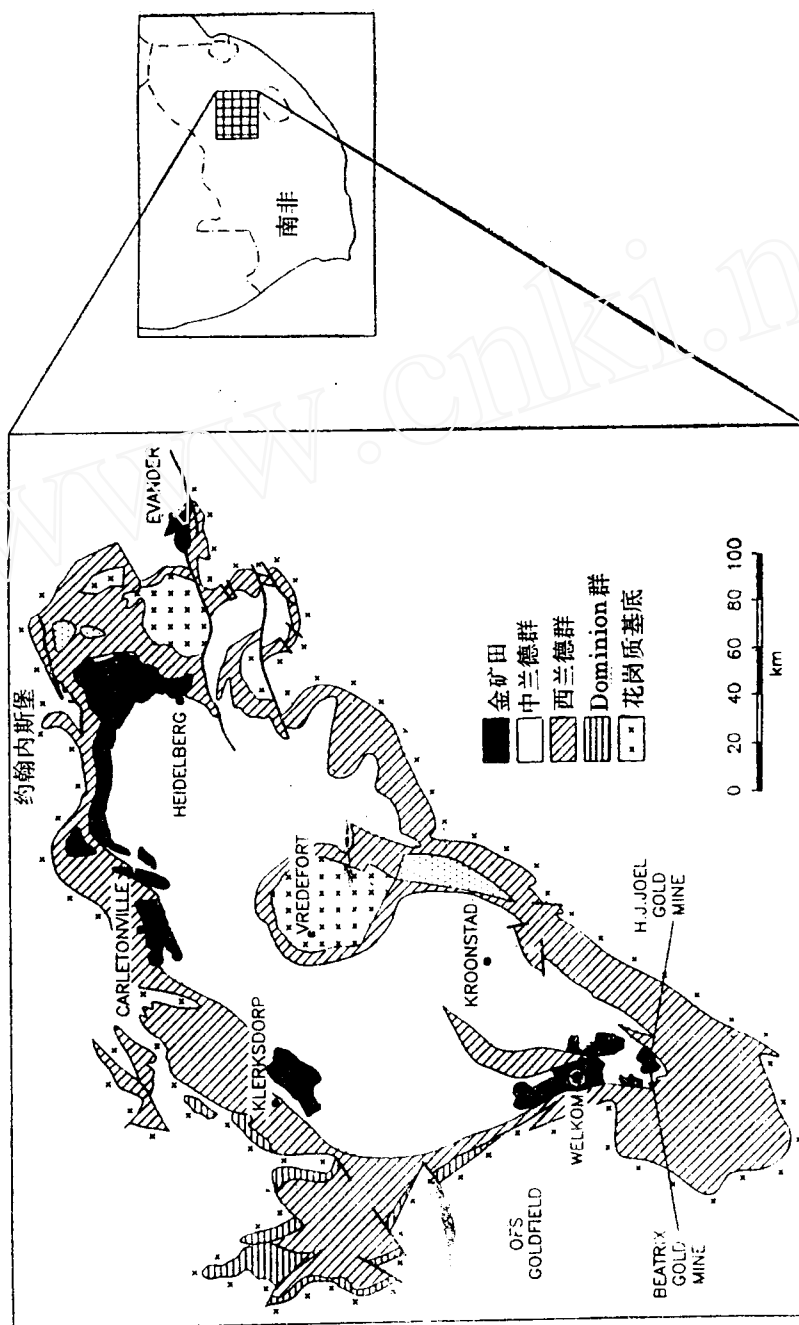


图2 兰德盆地 Dominion 群、维特瓦德斯兰德超群分布图

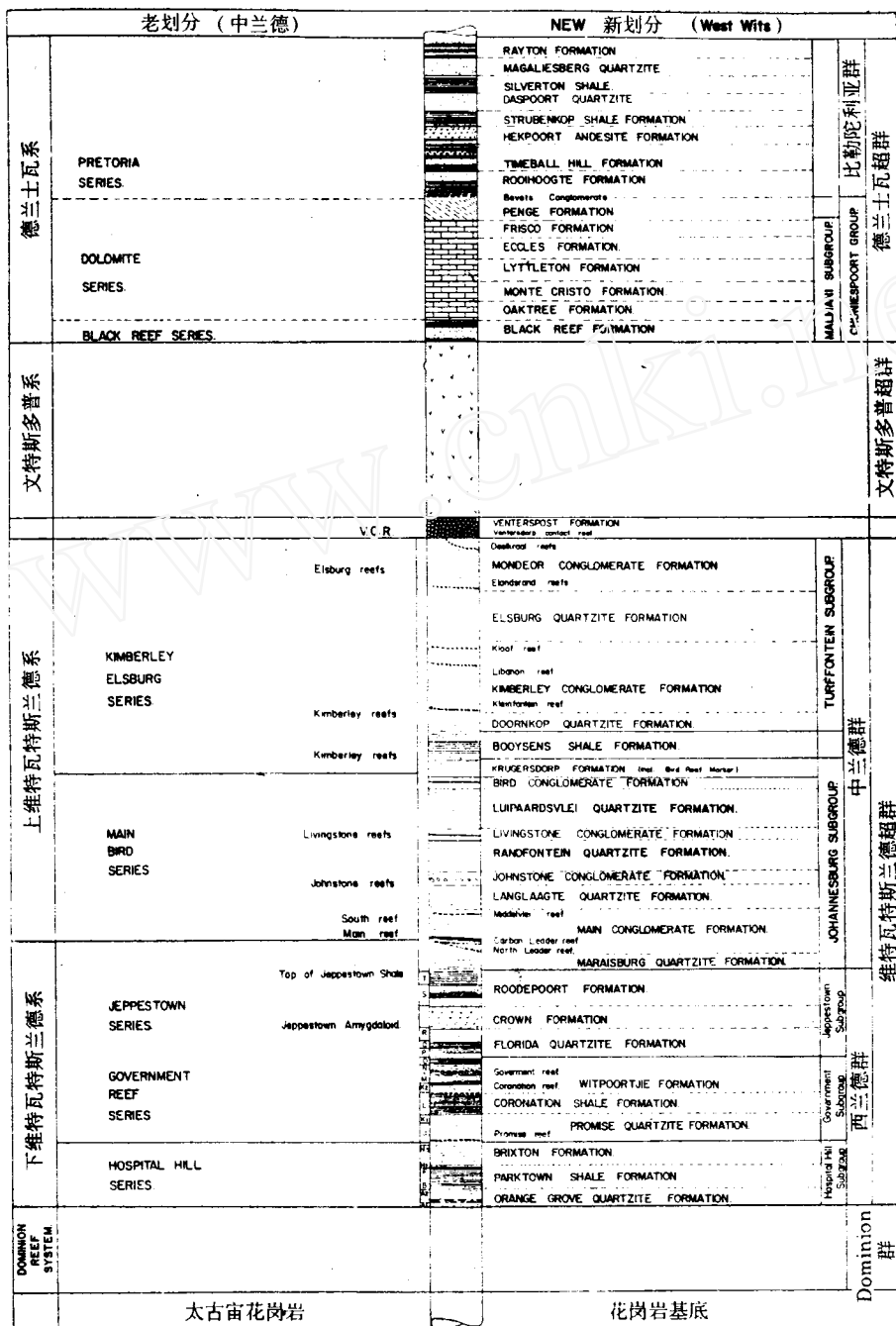


图3 West Driefontein 矿区地层柱状图

和沥青铀矿的碎屑。

对兰德型金—铀砾岩矿的成因有二种观点，一种是沉积形成；另一种是热液—沉积成因，前者是对该类金—铀矿的主导成因观点。

沉积成因观点的主要依据是：(1)金—铀砾岩都是产在太古宙地壳形成以后，大陆上升的第一旋回，主要富集在每个旋回的底部或者靠近底部，产出在早元古代的一定层位内，受层位控制明显；(2)金铀矿化受岩性控制明显，主要赋存在石英砾岩和有关石英岩沉积岩内；(3)含矿砾岩一般产在古老河床和三角洲；(4)矿体常成层状；(5)没有重结晶的金，沥青铀矿和黄铁矿呈滚圆状碎屑颗粒；(6)金、沥青铀矿、黄铁矿同其他的碎屑重矿物独居石、锡石、铬铁矿、榍石等共生；(7)金属矿物在岩石中有规律分布，一般在岩层底部富集。黄铁矿和沥青铀矿在氧化环境中是很容易氧化的，金—铀砾岩总是出现在灰色岩石中，这反映早元古代早期大气缺氧的结果。

控制金铀砾岩矿床形成的主要因素是：(1)大气圈缺氧的地球化学环境；(2)有利的沉积和保藏的构造条件；(3)特殊的古地理环境，金矿田位于太古宙火山沉积岩类和花岗岩穹窿之间的下陷部分，呈现河积扇或者扇形三角洲的形状；(4)花岗岩—绿岩带基底，被认为是金和铀的主要来源。

热液沉积成因说的主要依据是：(1)矿田形成在构造岩浆活化区，在盆地的北西和南部边缘有巨大活动断裂带，控制矿床空间产出；(2)砾岩形成在同生活化的大断裂边缘裂谷拗陷，该部位在盆地中有含矿热液进入；(3)滚圆状黄铁矿不是硫化物矿床的侵蚀结果，是在地球深部，在形成砾岩的同时，有强大的含矿气液流体所致；(4)黄铁矿假卵石的地球化学特征说明成矿是慢源的。

West Driefontein 金矿的地质特征

West Driefontein 金矿位于约翰内斯堡市的西南，西兰德矿田的西部，属于南非金田公司开采和管理。金矿1948年发现，1952年开采生产，至今已开采6650吨，平均磨矿品位24.8 g/t，其中最高达43 g/t，尾矿为0.3 g/t，生产黄金1650吨。金矿工人17000人，其中管理人员125人，技术人员2500人，有6个生产竖井，开采深度达2600—2700m，矿区东西长15km，南北宽12km。

矿区岩性地层柱见图3。区内基底太古宙花岗岩在矿区内不出露，西兰德群仅局部可见，中兰德群和 Kimberley 砾岩组普遍发育，在 Timeball Hill 组下部的黑矿组也可见。

区内维特瓦德西兰德超群的岩层南倾20°—25°。矿区南东部位 Ventersdrop群的熔岩呈较小角度不整合覆盖在维特瓦德西兰德超群上面，而二者岩区又被 Transvaal超群呈明显的角度不整合覆盖，两者角度差达15°—20°。

区内矿层共三层：1、Carbon Leader；2、Middelvlei Reef(Main)；3、VCR (Ventersdorp Contact Reef) (图4)。

Carbon Leader：该矿层可与中兰德群的主 Main Reef 矿层对比，是在石英岩、粗砂岩或砾岩中富含碳质的条纹和夹层或者是这些沉积物的混合。在这些富含碳质石英岩中，有被矿化的磁黄铁矿和黄铁矿。在夹层中常有含卵石的层，局部富含碳质，卵石是滚圆状石英，很少大于3cm。矿层厚度变化从条纹到含炭厚7cm条带，到厚达200cm的含

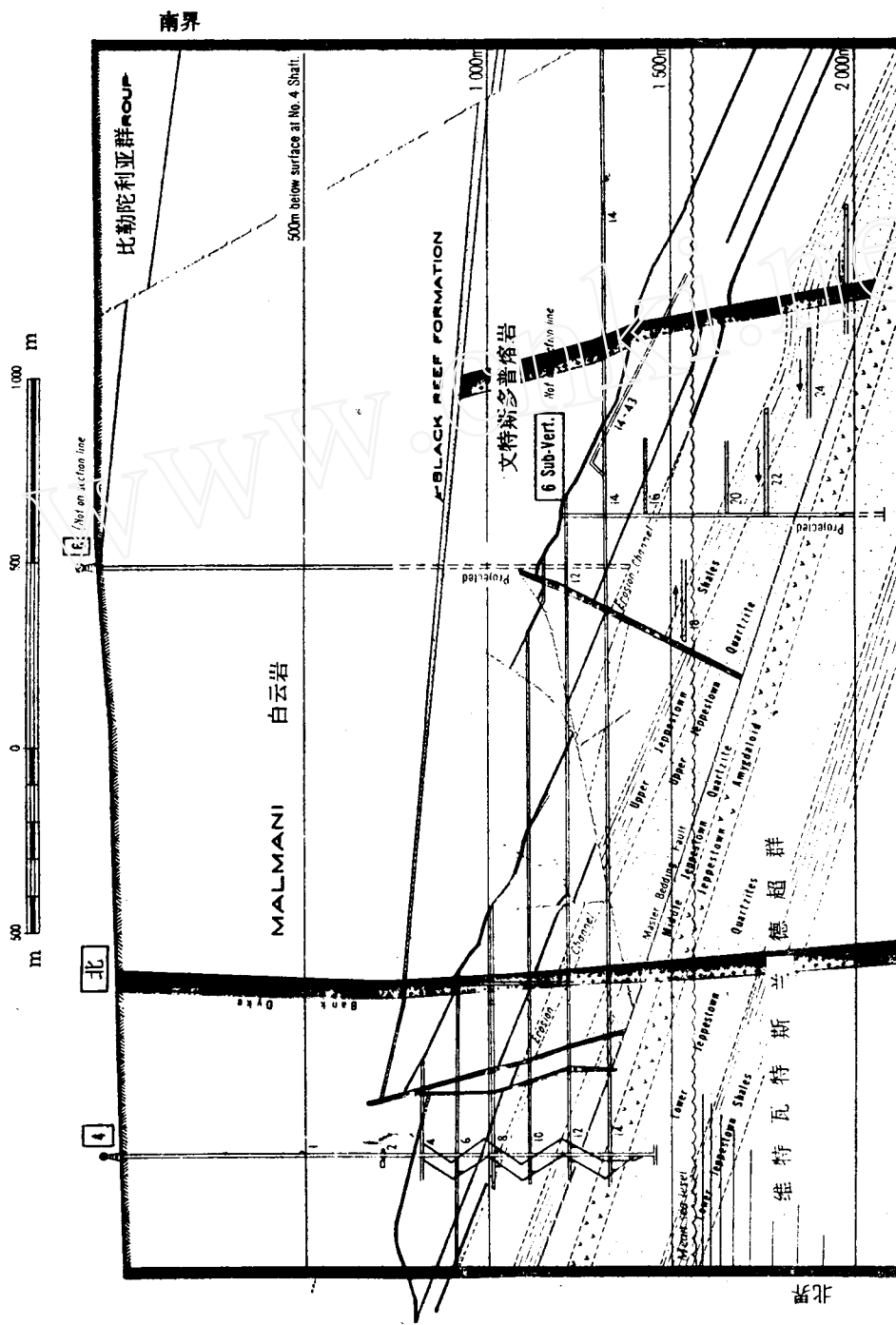


图4 West Driefontein 金矿矿层分布图

多条带中等卵石的砾岩层,在粗砂岩和卵石的发育区,碳质可缺失,Carbon Leader矿层内金、铀含量高,同时含碳也高,有时在炭质线上可见明金,品位有时达100 g/t,平均10 g/t。

Middelvllei Reef (Main Reef) 矿层:该矿层可与中兰德群 South Reef 对比,在 Carbon Leader 矿层上部50m处,是含大卵石的砾岩条带,这些条带局部可分上、中、下三个条带,卵石直径可达30mm,有时可见大于60mm卵石,卵石滚圆度好,主要是石英脉的侵蚀结果。Middelvllei Reef 矿层厚度可达4m,由发育较好的上、中、下三个条带组成,它们之间被石英岩隔开,品位5—6 g/t。

VCR (Ventersdorp Contact Reef) 矿层:该矿层位于 Ventersdrop 超群的底部,冲积扇沉积作用形成,按其形成条件可分近源型和远源型二类。West Driefontein 矿区主要是近源型,它由单成分的和复成分的砾岩夹层组成。

2 金刚石

南非金刚石资源十分丰富,储量为7000万克拉,储量基础为15000万克拉,为世界总储量的7.1%,居世界第四位。南非金刚石1991年的产量为8 430 000克拉,1992年为10156112克拉,产量在澳大利亚、扎伊尔和博茨瓦纳之后,列为第四位。金刚石产品中,宝石级为25%,近宝石级的为37%,工业级为38%。1992年金刚石的产量中94.5%来自 Dutoitspan, Bulfontein, Wesselton, Koffiefontein, Finsch, Namaqualand, Premier 和 Venetia 8个矿山。南非金刚石矿床分为两类:原生金伯利岩型和砂矿。A) 原生金伯利岩型是南非金刚石的主要来源,从1870年在南非发现世界上第一个金伯利岩管以来,至今在南非已找到直径大于100m的金伯利岩管约350个,其中较具规模有 Premier, Finsch, Koffefotein, Kimberlite, Bulfontein 等,这些金伯利岩管主要产在 Kaapvaal 克拉通内。除 Premier 岩管群的金伯利岩为前寒武纪形成外,其余以白垩纪的产物为主。南非的金伯利岩管,和其他国家一样,往往是成群出现,从东北部的 Premier 岩管,到西南部的“亚赫斯丰坦”岩管,在这个长约1500km,宽约250km的北东向地带内,分布着大量的岩管群,主要有 Cullinan-Rayton (库利南—莱顿)(也有人称 Pretoria 比勒陀利亚)岩管群、金伯利地区岩管群、科非丰坦岩管群、亚赫斯丰坦岩管群、波肖夫岩管群、克龙斯塔德岩管群、西别尔克利岩管群、波斯特马斯堡岩管群、布什曼兰德岩管群等。B) 南非金刚石砂矿按形成时代可分两大类:(1)是早元古代维特瓦德斯兰德群砾岩中的金刚石砂矿;(2)现代金刚石砂矿,主要是德兰士瓦西南的砂矿区、瓦尔河流域的砂矿和奥兰治河的砂矿,这类现代金刚石砂矿在南非金刚石砂矿中具有很大的经济意义。

这次我们对 Premier 金刚石矿床进行了考察, Premier 是南非最大的金伯利岩管,是 Cullinan-Rayton 岩管群中11个金伯利岩管的一个,位于 Pretoria 北东37km,由于1905年发现世界上最大的重3106克拉(625克)库利南钻石而闻名于世界。Premier 从1903年开采金刚石起,至今已达90多年,已从地表露采转到井下开拓,目前井下开采已到630m中段,年开采金刚石2百万克拉,1991年为2249728克拉,矿石品位为30.8克拉/

百吨，1992年为2444219克拉，品位为35.3克拉/百吨。**Premier** 矿山是世界上以产含硼的2B型金刚石闻名。

Premier 金刚石矿山地表出露面积32公顷，岩管的侵入时间是1200Ma，被厚75m，埋深在地表以下380—500m的辉长岩岩席所切断。岩管穿切的围岩有中元古代 **Waterberg** 群石英岩和砾岩，可能是早元古代 **Rooiberg** 霏细岩、苏长岩和早元古代 **Transvaal** 超群的石英岩、页岩、砂岩和白云质页岩（见图5）。大块的石英岩和砾岩捕虏体 **Waterberg**，主要分布在火山堆积物上部的侵蚀面附近。霏细岩岩块在火山堆积物中也可见，岩石灰色到红色，有时呈斑点，在薄片可见岩石由基质和斑晶两部分组成，斑晶

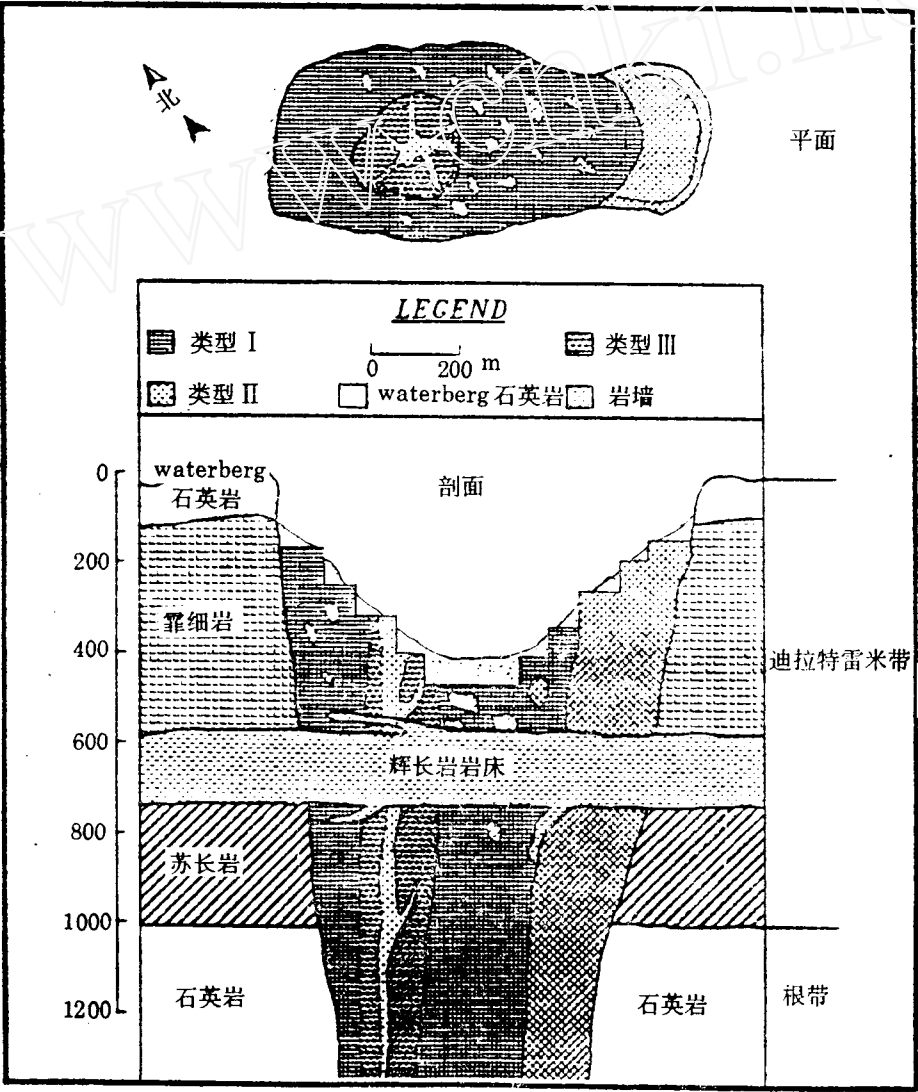


图5 Premier 岩管地质图

有单斜辉石和许多的针状石英, 基质由隐晶质的石英和钾长石组成, 该霏细岩可与 **Rooiderg** 霏细岩对比, 也可能是 **Waterberg** 或 **Pretoria** 超群的石英岩长石化结果。辉长岩岩席厚75m, 走向东西, 倾角向北 15° — 20° 。岩席形成时代为1150Ma。同时有两大条岩枝和一些小岩枝等侵入火山岩席。岩席具有三组节理: 近水平和二组近垂直, 岩席对邻近的金伯利岩在15m内产生变质作用, 在1m以内为橄榄石—顽火辉石变金伯利岩, 1—10m处为透辉石—角闪石金伯利岩, 10—15m为蛇纹石—角闪石金伯利岩, 在岩席1m, 有时可达8m处金刚石全被破坏, 从接触带15m以后, 才具有金刚石工业品位。变质的金伯利岩具有较高的硬度。苏长岩可以与 **Bushveld** 杂岩的 **Main Zone** (主要带) 苏长岩对比, 岩石具有暗橄榄绿色, 6到7组节理, 在岩管附近和剪切带内节理较发育, 在苏长岩体下部是 **Transvaal** 超群的石英岩、页岩、砂岩和白云质页岩。

在平面上, **Premier** 金伯利岩具向东压缩的椭圆状或肾状 (图6)。在地表, 岩管沿东西方向长860m, 南北方向宽400m, 面积为32公顷。岩管与围岩的接触界线清楚, 平均为 85° , 因而岩管深度每增加100m, 则面积减少6.9%。在500m水平, 岩管为 800×300 m, 面积为21公顷。钻探资料提供, 地表1000m以下, 在东部有5公顷褐色金伯利岩中有较高品位的岩管, 在西部有较大的岩管, 主要由灰金伯利岩组成, 它包围着浅成的岩心, 面积为8公顷。**Premier** 岩管的理想化几何图形是: 上部火山道有规则外形, 具平滑的、陡倾斜的接触; 500m深处, 岩管沿 “**Franspoort**” 线方向延伸; 1000m深处具火山道相。

Premier 岩管内有三次主要金伯利岩侵入, 二次为典型的凝灰质金伯利角砾岩, 最后一轮的侵入相为浅成金伯利核杂岩, 共有4类金伯利岩和最晚阶段的高碳酸盐的金伯利岩脉。

灰或1型金伯利岩, 不等粒结构, 常含大量的捕虏体, 捕虏体主要来自围岩, 在岩管中部碎屑岩多数是红的 **Waterberg** 石英岩和砾岩, 局部可占岩石总数80—90%。在岩管西部是细粒的黑白云质页岩和石英岩碎屑岩。苏长岩碎屑也有分布, 但数量不多, 碎屑中也有蚀变超镁铁质岩和方辉橄榄岩派生的斜方辉石的捕获晶。地壳捕获晶和分布较广的幔源钛铁矿、石榴石、水石榴石、斜方辉石、单斜辉石、金云母也有产出, 基质是细粒透辉石和大量蛇纹石, 较多的基质已蚀变为粘土。1型金伯利岩属于透辉石—蛇纹石型, 结构是凝灰质金伯利角砾岩。岩石发育两组节理, 近垂直和近水平的。

褐或2型金伯利岩, 不等粒结构, 橄榄石假象分布在其他粗粒矿物中, 尤其是从幔源分离出方辉橄榄岩的蚀变板条状斜方辉石中。粗晶金云母、蚀变斜方辉石、钛铁矿和较少单斜辉石亦有产出, 捕虏碎屑较多, 同灰金伯利岩相比石英岩较少, 苏长岩较多, 基质主要是很细的针状透辉石 (长 0.03mm), 间隙填充物是金云母, 属于透辉石金伯利岩, 局部可能是透辉石—蛇纹石—金云母金伯利岩, 近水平和近垂直的节理发育。

褐和灰金伯利岩都属于 **TKBs** 型。

浅成核金伯利岩

黑金伯利岩 (3型), 不等粒结构, 含有大量橄榄石假象, 呈他形粗晶和细小自形晶, 围岩捕虏体分布广泛。包体有红石英岩、页岩、橄榄岩, 苏长岩较少, 尖晶石、铬透辉石、石榴石也很普遍, 石榴石有时蚀变为水镁铝榴石。基质是细粒透辉石 ($<0.05\text{mm}$) 和蛇纹石, 透辉石板条晶大于灰和褐金伯利岩, 钙钛矿和不透明矿物及金云母局

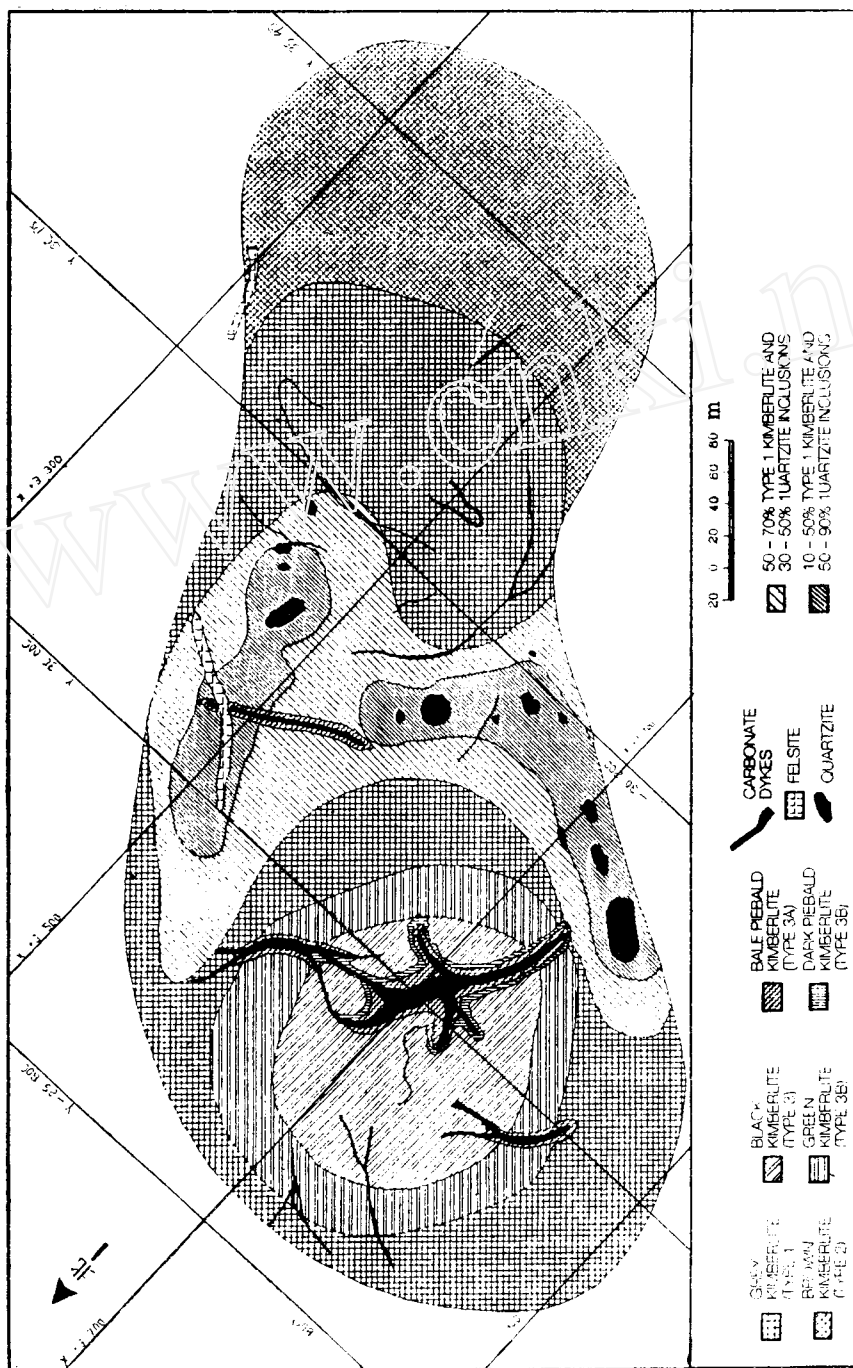


图6 Premier 矿 538米水平地质图

部分布广泛,分异结构发育差。3型金伯利岩属于透辉石—蛇纹石金伯利岩。金伯利岩发育2组近垂直的和1组近水平的节理。灰和黑金伯利岩的接触界线是渐变的。

淡斑杂金伯利岩(3A型)(Pale Piebald Kimberlite):这是浅成核金伯利岩的一种,常发现在几十米厚高碳酸盐金伯利脉岩内。该金伯利岩的特征是在基质中有白色或白边的蚀变围岩碎屑,碎屑普遍碳酸盐化,大小10—200mm。黑色不蚀变的捕获体是方辉橄榄岩、变形石榴二辉橄榄岩。在镜下可见浅成相的金伯利角砾岩和二种橄榄石。在细的基质中可见分布较广泛的钙镁橄榄石,浅斑杂金伯利岩和脉岩,深斑杂金伯利岩的接触界线是清楚的,浅斑杂和黑浅成金伯利岩的接触界线是渐变的,岩石有时发育较好的节理。

暗斑杂金伯利岩(3B型),该金伯利岩形成于浅成岩颈中心,常同富碳酸盐金伯利岩脉共同产出,且被后者所切穿。深褐灰色金伯利岩角砾岩含明显的白色到浅色包体。这类金伯利岩的明显特征是,在包体附近褐色、暗褐色到某些地区是浅褐色和紫色,蚀变橄榄绿色的橄榄石粗晶较发育;钛铁矿和水榴石亦有分布,超镁铁质捕虏体比浅斑杂金伯利岩分布为少;暗斑杂金伯利岩和浅斑杂金伯利岩的接触界线是清楚的,但与黑金伯利岩是渐变的,岩石含较多的粗晶和假象橄榄石和大的蚀变的围岩捕虏体,钛铁矿和幔源捕虏体碎块经常分布,基质是细小板条状金云母、不透明矿物、钙钛矿和钙镁橄榄石的残余,蛇纹石分布普遍。这类金伯利岩属于富不透明矿物、钙镁橄榄石—金云母的1类金伯利岩。

黑浅成金伯利岩(3C型),仅发现在615m水平以下,黑到深灰色,含少量包体(不超过岩石5%),包体常蚀变为方解石。新鲜的金伯利岩是典型的粗晶钙镁橄榄石,方辉石、蛇纹石、不透明矿物、钙钛矿分布较多,橄榄石粒径可达10mm,而且特别新鲜,在Premier矿山仅有此类金伯利岩见新鲜橄榄石和钙镁橄榄石。

富碳酸盐金伯利脉岩:这是先存金伯利脉岩热液蚀变的矿物,岩脉分布很广,而且侵入到所有类型的金伯岩,岩脉厚度变化从几厘米到15m。在浅成核杂岩中见厚度大的脉岩形成放射状,脉岩从粒度很细小的暗黑色岩石到粒度粗大的有时浅色岩石。

金刚石:Premier金刚石中20—30%是宝石级,其余是近宝石级和工业级,金刚石回收下限是1.0mm,百分比较少的产品是呈自由氮的2型金刚石,其中有时含特大的2a金刚石和浅兰色2b金刚石,2b金刚石含硼,质地不纯,大的晶体由于特殊热、电传导性可用于航天工业。

矿山开采的是含10克拉的矿石。在最近7年,矿山生产了1083克拉松脂褐色宝石和599克拉的世纪金刚石,矿山产出了几块600克拉宝石,在矿山获得的金刚石的颜色较多,有白色、褐色、不同色调黄色、绿色和2b型浅兰色。Robinson对取得褐、黑和灰金伯利岩中500块宝石进行了研究,得出岩管中不同的金伯利岩产出不同品种的金金刚石的结果。金刚石内含有较多包体,40%含硫化物,99%包体或是橄榄岩,或是榴辉岩。金刚石中榴辉岩的石榴石,分成浅色和暗桔黄色二部分,用Sm—Nd和Rb—Sr法测定石榴石包体的同位素年龄是 $1150 \pm 60\text{Ma}$ 。在金刚石中二辉橄榄岩包体定年为1900Ma,方辉橄榄岩包体定年为3200Ma。

超镁铁质捕虏体主要有五类,即粗粒石榴石二辉橄榄岩,变形石榴石二辉橄榄岩,

I 型方辉橄榄岩, II 型方辉橄榄岩和 III 型方辉橄榄岩。在 Premier 矿山含尖晶石方辉橄榄岩是方辉橄榄岩类中分布次要的岩石。榴辉岩分布较少。

重矿物: 对不同金伯利岩中重矿物进行了研究, 钛铁矿分布最广, 其次石榴石、铬透辉石、尖晶石。铬铁矿、石榴石、铬透辉石的比为 100 : 1 : 1。褐金伯利岩中钛铁矿分布较多, 但石榴石、铬透辉石分布少。石榴石较多分布在灰和斑杂金伯利岩中, 钛铁矿分布次要, 在富碳酸盐金伯利岩中, 重矿物很少, 不同类型金伯利岩中石榴石种类分布也有区别, 如灰金伯利岩主要是镁铝榴石 (66—68%), 其次是钙铬榴石 (14—16%) 和镁铬榴石 (7%)。黑金伯利岩含 75% 镁铝榴石和少量的钙铁榴石、钛榴石、钙铬榴石、铁铝榴岩和铁榴石。

3 铂 矿

南非铂矿于 1900 年由地质学家梅林斯基发现, 产于布什维尔德杂岩体内斜长岩与苏长岩之间, 称之为“梅林斯基矿层” (Merensky Unit) 储量列世界第一。1992 年南非矿产能源部宣布其铂族金属储量底数为 58900 吨, 占世界铂矿金属储量底数 (67041 吨) 的 87.9%, 铂族金属作为主要产品从矿山中直接产出, 这在世界上也是独一无二的。

代表团考察了由英帕拉有限公司开采的英帕拉铂矿山 (Impala Platinum Mine), 该矿山位于首都比勒陀利亚 (Pretoria) 90 公里的吕斯滕堡 (Rustenburg) 之西北 (见图 7)。矿山面积 6.5 km², 土地属于班图族人的某个部落 (为不可转让的土地), 因此公司每年需向该部落交纳 14.9% 的所得税。该矿山于 1968 开采, 已打 12 个竖井, 开采深度达 1000 米 (钻孔已控制到 2000 米), 全矿职工约 3 万人, 每日井下有 2.5 万人工作, 日采掘约 15 km, 年产铂矿 30 吨, 根据保有储量, 估计该矿还可采 60—150 年。

布什维尔德火成杂岩体呈一个倾斜平缓, 延伸宽广的岩盆产出, 东西方向宽约 500 km, 南北延伸近 250 km, 面积约 65000 km², 已控制厚度约 4000—5000 m, 侵入于 Pretoria 群碎屑岩中, 上覆 Rooiberg 群火山岩。杂岩体上部是花岗岩, 结晶分异程度较高, 出露于岩盆中部, 经 Rb—Sr 年龄测定, 约为 2054 Ma, 下部为斜长—苏长岩, 年龄为 2060 Ma, 与花岗岩呈侵入接触, 二者被认为是不同源产物。

在 Impala 矿山, 该杂岩体走向为北北西—南南东, 局部呈东西向, 倾角约 10°, 梅林斯基矿层分布于基性岩偏下部临界带, 层位十分稳定, 沿走向可追索 200—300 km, 沿倾向已控制 25 km, 呈层产出, 好像沉积岩层模样, 主要由斑点状斜长苏长岩组成并含有薄层的斑杂状斜长苏长岩, 下部有铬铁矿层和辉石岩, 铂族金属的工业矿床则产于伟晶状的方辉辉橄岩中, 品位为 4—15 g/t, 下盘通常由含少量辉石的斑杂状斜长岩组成, 上盘则由辉石岩组成。下部边界的铬铁矿层 (UG2) 中的某些部位也是重要的铂矿层。在梅林斯基矿层中可以看到下部以含辉石晶体为主, 上部则以含长石晶体为主, 虽然梅林斯基矿层中铂族元素含量很高, 而一旦进入上盘或下盘时就立即消失 (在其它矿山偶尔也有例外)。

根据 Impala Bafokeng 北矿山坑道柱状图将临界带由下而上各层岩性特征简述如下:

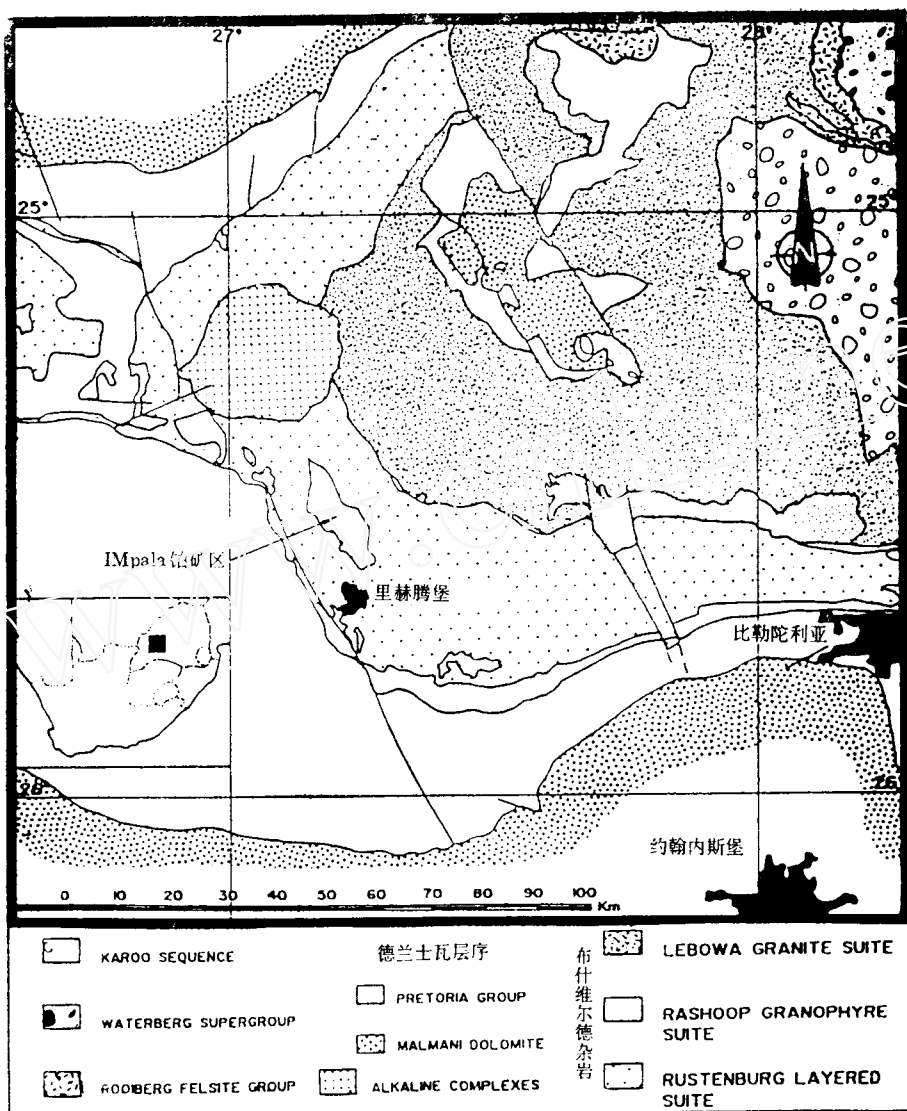


图7 布什维尔德火成杂岩体西端地质图
(图中里赫腾堡应为吕斯腾堡)

下部层:

UG1: 为铬铁矿和斜长石堆晶岩的互层, 具有侧向尖灭的特征。铬铁矿主矿层与底板斑状斜长岩(FW16)直接接触, 界线截然。铬铁矿层可以分叉, 形成 2 个或更多的厚在 1 米之内的铬铁矿层, 其中夹有透镜状的辉石岩或斜长岩。铬铁矿层之上为淡褐绿色辉石岩, 厚约 6—8m, 由斜方辉石堆晶和鲜绿色单斜辉石主晶组成。辉石岩上还有 1—10cm 的铬铁矿层覆盖。

FW13: 斑点状斜长岩

UG2: 底部为粗粒斜长石、斜方辉石组成的似伟晶状辉长岩, 厚度可由 0—150cm,

平均50cm。如果这层缺失，通常会导致铬铁矿中壶形空穴（Potholes，是一种崩落构造，呈圆形，小的几厘米，大的可达几米至数十米，深度可发生在地下100m以下）的缺失。其上为铬铁矿层，厚约60—80cm，常发育壶形空穴。铬铁矿层上部为斑状辉石岩层，厚约8m，与铬铁矿界线截然，其间经常出现三个铬铁矿层，每层厚仅几厘米，当地称为“三连层标志层”，总厚度可由45cm到几米。“三连层”与铬铁矿层之间有时还有一个几厘米厚的铬铁矿薄层。UG2层中的铂矿主要富集于铬铁矿层中，很少以硫化物形式出现，主要为铂族元素的金属互化物。通常，铬铁矿层下盘是伟晶状含长石辉石岩（斑点状辉石岩）者铂含量就高，反之含铂低。

FW12：杂色斑状斜长岩，厚8—12m

FW11：斑点状斜长岩

这两层可以在UG2上部反复出现。

中部层：

FW10：主要为斜长质苏长岩，Baforkeng剖面则出现一层0.1-3m厚的方辉辉橄岩。

FW9：斑状斜长岩（含斜方辉石、橄榄石）

FW8：斑点状斜长岩

FW7：厚层状苏长岩（辉长岩）厚约30—60m

通常，辉长岩是结构均匀的岩石，斜方辉石（紫苏辉石）堆晶颗粒大小可达3mm，靠近FW7顶部，有时出现一层（或多层）特征层，即暗黑绿色蛇纹石化的橄榄石和单斜辉石（异剥石）组成的岩层，当地称为“橄榄石板状苏长岩，厚度变化可由20—140cm，FW7顶部几米处还常常显示发育完好的层理，与FW6接触界线截然。

上部层：

FW6—FW1：很容易识别，形成了有用的标志，并控制了其下部层的发育。

FW6和FW4：斜长质和斑状斜长岩，有明显的变薄趋势，在北部穿过Impala lease区，顶部接触面有薄的铬铁矿层。

FW5和FW3：为均匀变化的斑点状斜长苏长岩，也显示北部变薄。

FW2：为辉石岩和斜长岩的交互层，厚度小。

下部为1—2cm厚的伟晶状辉石岩，上覆斑点状斜长岩，其上是斑状斜长岩，相互交替，与FW1接触界线截然。

FW1：是发育不好的交替层，由斑点状斜长苏长岩和斑状苏长岩组成。

梅林斯基层：是一个非常规则的完整的交替层，在Impala的厚约10—13m，层位容易识别，底部为伟晶状辉石岩，不太发育，向上颗粒由粗变细，成为苏长质岩层（称Midding 1），变为斑点状斜长岩（称Midding 2），变为斑状斜长岩（称Midding 3）。“梅林斯基矿层”（Merensky Reef）是一个常用的术语，为梅林斯基层的一部分，是最有经济价值和值得注意的铂矿层。可有三个层位：

“A Reef”：FW1顶部，可以是辉石岩或伟晶状岩石，大部分发育壶形洞穴，有橄榄石和铬铁矿时铂矿含量最富，多呈硫化物出现，品位可达15g/t，还有0.1—0.2%镍和0.1—0.15%的铜。

“B Reef”：在FW2上也是伟晶状岩石，此层位较少见。

“C Reef”：在FW3上部或在其他层位下部，也是伟晶岩状辉石岩。

Bastard 层

底部为薄层状铬铁矿，其上为斑点状辉石岩，约3m厚，常与梅林斯基层同时出现，与 Midding 3接触界截然。该层上部为9m厚苏长岩(HW1)和有2—3层斑状斜长岩(HW2)，上部还有HW3、4、5层，是以不同斑点大小和基质变化为特征。

HW5可以认为是临界带的顶部。

铂族金属和其他金属几乎总是与两个铬矿层及铬矿之间的辉石岩伴生，铂族元素与Cr、Cu、Ni都有明显的正相关性，铂(Pt)、钯(Pd)常共生于黄铜矿、镍黄铁矿中。这些硫化物集合体有时颗粒粗大，肉眼很易分辨。分析结果表明，铂与铬的相关关系比钯与铬更为密切。铬铁矿层被视为铂矿标志层。最常见的铂族矿物是硫铂矿（含铂族元素25%）、硫镍钯矿（含铂族元素60%），其次为硫钨钼矿（含铂族元素5%）。

关于铂矿成因的讨论一直存在争论，主要有两种观点。

一是岩浆重力分凝说。鉴于铂族金属总是与富含挥发分的晚期分异产物—伟晶状、似伟晶状岩石有关，而且有明显的“假层理”，因此认为铂族金属是岩浆分异的结果。硫化物溶液起捕获铂族金属的作用，而铬铁矿则起沉淀铂族金属作用。

另一种观点为热液成矿说。鉴于矿物学的飞快发展，由于探针技术的广泛应用，有几十种含铂的新矿物不断被发现，不少是呈铂的合金或含铂金属的铁合金形式出现，成分十分复杂，（在UG2层中更为显著）有时充填在硅酸盐裂隙中，并交代硅酸盐。因此认为，铂族元素和金等其他元素一样，可以在高温或低温溶液中溶解，铂矿主要由液相富集，蛇纹石化作用是铂在变质环境中富集的主要因素。特别值得注意的是，有时见到铂矿物和石墨的共生组合，说明铂族金属和部分铁、铜、锌可能曾以游离的碳化物状态被运移，其形成的温度和环境是一个十分复杂的过程。这种观点还解释了壶形洞穴的出现，很可能是斜长岩还处在塑性状态时这些碎块就下沉了。同时认为，伟晶状方辉橄岩及纯橄岩很可能是高温热液交代辉石岩而成，没有“根”，因而铂族金属经常堆积在铬铁矿层附近。