南非主要金矿集区研究现状及存在问题

王杰,任军平,何胜飞,许康康,刘晓阳,左立波,孙凯,龚鹏辉,贺福清
天津地质矿产研究所,天津,300170

内容提要: 南非是世界上金矿石资源量最为丰富的国家,其金矿床主要产于东北部地区,主要有三种类型:①赋存于兰德盆地砾岩型建造中的"兰德"砾岩型金矿床,② 产在绿岩带中的绿岩带型金矿床,和③主要与白云岩有关的白云岩型金矿床,以前两种类型为主。"兰德"砾岩型金矿床通常品位高,开采规模最大,目前采矿的深度最大,是南非最重要的矿床类型,其矿床成因长期以来存有争议,主要有两种观点,分别是砂矿模式和热液模式,就目前资料来看笔者等认为其代表了两个不同的矿化阶段;绿岩带型金矿床则以巴伯顿地区为代表,矿床具有规模大、易开采等特征,因此在南非金矿床开采中占有重要位置,其矿床主要赋存于石英脉或剪切带中, 矿床成因主要有三种,分别是火山成矿模式、转换滑脱构造模式和构造交叉模式。

关键词:"兰德"砾岩型金矿床;绿岩带型金矿床;白云岩型金矿床;矿床成因;兰德盆地;巴伯顿地区;南非

中国是黄金的消费大国,而且有逐年增加的趋势,据中国黄金协会统计数据显示(刘晓峰,2013),2002年中国黄金消费量仅为206.7 t,到2008年,这一数值增长到425.7t。2011年,黄金消费量为761.05 t,比上年增长了近190 t,增幅高达33%。2012年再创新高,全国黄金消费量832.18 t,比上年增加71.13 t,同比增长9.35%。2013年上半年全国黄金消费量达到706.36 t,比2012年上半年增加246.78 t,同比增长53.7%(中国黄金协会,2013)。南非地处非洲的最南端,作为世界上金矿石资源最为丰富的国家之一,据报道目前全球已查明黄金资源储量约为10万吨,其中南非是全球最大的黄金资源拥有国,已查明资源储量为3.1万吨,黄金的储量居世界第一位(佚名,2011)。

南非主要金矿床分布于东北部的威特沃特斯兰德(Witwatersrand)盆地和巴伯顿(Barberton)地区绿岩带中(图1),其中98%的黄金产自兰德盆地的太古宙砾岩中,一百年来其黄金总产量居世界各种类型金矿之首(其它地区著名的砾岩型金矿床如加纳的塔库瓦(Tarkwa)金矿床和巴西的雅科比纳(Jacobina)金矿床),其砾岩矿床中金主要呈很细的分散状态的自然金(5~100μ),金矿体以丰富的黄铁矿为标志,伴随有硫化物、砷化物和硫盐类等(Boyle,1989;陈毓川等,1995)。砾岩型金矿是地质时期最早的古砂金,其主要形成于克拉通稳定地块内的裂谷盆地中,长期接受风化剥蚀物的沉积。然而产于巴伯顿地区绿岩带中的绿岩型金矿床,该类型金矿床具有规模大、易开采等特征,因此在南非金矿床开采中占有重要位置。相比较威特沃特斯兰德盆地砾岩型和巴顿山地区绿岩带型金矿床,白云岩型金矿床分布少,储量小。

鉴于南非金矿床主要产于东北部地区,而对金矿床的研究也主要集中在这个地区,因此,可以说威特沃特斯兰德盆地砾岩型(简称兰德砾岩型)和巴顿山地区绿岩带型金矿床的研究现状基本上就代表了南非金矿床的研究现状。

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"(项目编号:1212011220910)期间,对南非东北部金矿床的有关研究文献进行了系统收集和整理,对该地区金矿床成矿规律的研究现状和存在问题进行了总结,这不仅提高了我们对"兰德"砾岩型和巴顿山地区绿岩带型金矿床成矿规律的认识,也为国内金矿床的找矿提供了借鉴,而且为国内企业在南非东北部金矿床的找矿勘查提供基础信息和理论指导。

注:本文为中国地质调查项目(编号 12120112220910)的成果。
收稿日期:2013-09-10 ;改回日期:2014-04-21。责任编辑:章雨旭。
作者简介:王杰,男,1964年生。高级工程师。主要从事地质矿产勘查与研究工作。Email:wangjie513046@163.com。通讯地址:天津市河东区大直沽八号路4号;电话:022-84112928。

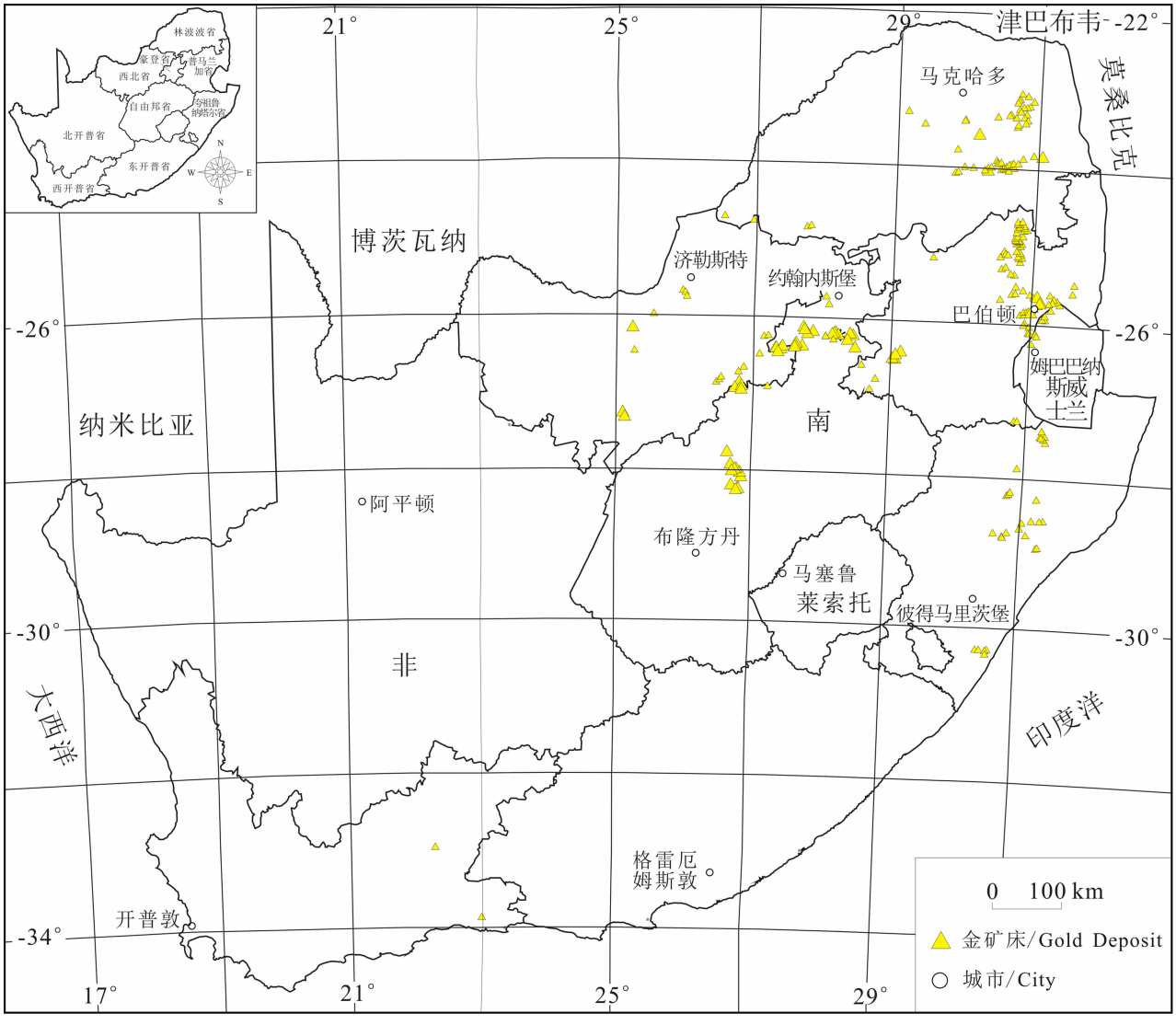


图 1 南非金矿床分布图(引自 Vorster,2005)

Fig. 1 South African mineral resources(after Vorster,2005)

1 研究历史

南非的金矿最早由 Karel Kruger (1834 年)在德兰士瓦(Transvaal)狩猎探险过程中发现,接着 1852 年 John Henry Davis 在 Groote Paardkraal 农场中发现了砂金,随后大约在 1867 年,Mauch 制作出德兰士瓦地区第一张地质图(Howarth,2012)。“兰德”砾岩型金矿床 1886 年由 George Harrison 发现,其金矿床开发已超过 120 年,威特沃特斯兰德盆地区区域地质填图最早是由 Mellor(1917a)完成,并且在后期地质工作中对其不断补充和完善,通过前期工作,他们对金矿床的研究有了更深的认识。Mellor(1917b)首先提出盆地地层划分,并且分别在 1980 年和 2006 年由南非地层术语和命名规则(SACS)所修订,Mc Carthy(2006)对该地区地层也进行了较全面回顾和总结。Mossman 等(1985)对“兰德”型金矿床的地球化学及古原核生物群落对金的溶解和沉淀可能发生的影响进行了深入的研究。Dankert 等(2010)对兰德盆地的构造特征和大地构造演化史进行了较详细的评述,为该类型金矿床的研究提供了较为详实的资料。许多学者通过可识别的倾斜的富矿脉和矿床内部矿体的勘探地质特征建立了矿石建造的沉积阶段模型和矿石再运移及富集的构造模型,同时也研究了盆地的区域沉积历史(Burke et al.,1986;Beukes,1990; Stanistreet and Mc Carthy,1991; Catuneanu,2001;Mossman et al.,2008),并且

许多地质工作者对盆地地理中心的弗里德堡(Vredefort)撞击构造也进行了研究(Mayer and Albat,1990;Lana et al., 2006)。

自从 1883 年巴伯顿地区金矿床的发现以来,超过 345 t 金已经从超过 350 个矿点中生产出来,其中大部分来自于希巴(Sheba)(123.7 t),费尔维尤(Fairview)(63.4 t)和新康索特(New Consort)(68.5 t)矿床(Anhaeusser,1986;Ward,1999;Dirks et al., 2009)。早期地质工作以 Hall(1918)为代表,南非地质调查局为其出版了该地区 1∶5 万地质图,后期较为完善的巴伯顿地区区域地质填图工作首次由 Anhaeusser 于 1981 年完成,并且对其岩石学特征也进行了研究。Dirksa 等(2013)对巴伯顿绿岩带中应力特征,后造山伸展特征和 3.01Ga 的金矿化特征进行了较全面的分析。巴伯顿绿岩带金矿床具有压扭性构造以及地体增生等特征,一般认为该类型矿床属于造山型金矿床(de Ronde et al., 1992; Goldfarb et al.,2005; Dziggel et al.,2010)(图 1)。

2　地质背景

对于南非东北部的金矿床研究,首先我们要从其区域构造演化说起,南非卡普瓦尔(Kaapvaal)克拉通在 3.5 ~ 2.0 Ga 期间经受了重要的构造演化,包括其在早期洋壳地体合并后,其南部和中部在 3.1 Ga 时期已合拼成一个单元;其北部和西部花岗绿岩地体(包括穆奇森(Murehison)岛弧)的合拼是 3.1 Ga 开始的地体增生的结果,并形成了之间的林波波麻粒岩片麻岩地体。在此期间,卡普瓦尔克拉通中部经受了拉伸作用,促使维特瓦特斯兰德、多米尼安、庞戈拉和文特斯多普盆地的发育,即以花岗岩—绿岩地体的构造、沉积盆地发育及威特沃特斯兰德盆地的变形表现的最为明显(李上森,1996)。

威特沃特斯兰德盆地层序(2985 ~ 2849 Ma, Kositcin and Krapež, 2004)上覆于多米尼安(Dominion)群的拉斑玄武岩—安山岩熔岩、石英岩和砾岩层(3074 ± 6 Ma;Armstrong et al.,1991),存在整合或不整合接触两种接触关系(Stanistreet and Mc Carthy,1991; Phillips and Law,2000;Mc Carthy, 2006),在某些地方由于多米尼安群的缺失,盆地层序直接与太古宙基底(3.6 ~ 3.2Ga;Poujol et al., 2003)呈不整合接触。文特斯多普(Ventersdrop)超群砾岩建造(2729 ± 19 Ma;Kositcin et al.,2003)上覆于盆地层序,并且文特斯多普超群的 Klipriviersberg 群、Platberg 群(约 2.72 ~ 2.63 Ga)与盆地层序均为整合或不整合接触。同时,以上这些地层不整合于上部的德兰士瓦盆地层序(约 2.58 ~ 2.20 Ga)以及显生宙的卡鲁(Karoo)盆地层序(190 ~ 180Ma;Duncan and Marsh,2007)。

巴伯顿地区绿岩带型金矿床,主要赋存于石英脉或剪切带中(Frimmel,2008),Goldfarb 等(2005)认为太古代绿岩为主的金矿床一般属于造山型金矿床,并且特征复杂以及经历多阶段变形历史,涉及剪切带,脉以及母岩的低至中级变质特征(Groves et al.,1998)。该类型金矿床已经具有变形构造晚期阶段的增生事件特征,一般从压扭状态直至扭断状态(Kerrich et al.,2000;Begg et al.,2009)。在巴伯顿绿岩带中发育的斯瓦士兰(Swaziland)超群(3.55 ~ 3.16 Ga),整个地层厚度大于 20km,其自下而上分为 3 个群:昂弗瓦特(Onverwacht)群、无花果树(Fig Tree)群和摩德斯(Moodies)群(Brandl et al., 2006;陈毓川等,1995)。昂弗瓦特群主要由镁铁质—超镁铁质火山岩和少量长英质火山岩,凝灰岩和沉积岩组成,厚度大于 15km,形成于 3.55 ~ 3.26 Ga 时期的浅海相环境(Lowe and Byerly, 2007; Byerly et al., 1996)。无花果树群主要形成于深海—浅海相环境,是泥质单元,厚度约 2km,由浊积岩、页岩、硬砂岩、隧石、BIF 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,不整合产在昂弗瓦特群上(Hofmann,2005)。摩德斯群属于浅海相环境,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,次要岩类包括 BIF 建造、燧石和镁铁质火山岩。该群呈假整合到不整合于无花果树群之上,其年龄从最早的 3226 ± 1Ma(Kamo and Davis,1994)至 3160 Ma(de Ronde and de Wit,1994)。

3　威特沃特斯兰德砾岩型金矿

3.1　矿床特点

兰德型金矿床位于约翰内斯堡南部的威特沃特斯兰德盆地周围(图 2),因此其全称为威特沃特斯兰德古砾岩型金(铀)矿,简称为兰德砾岩型金(铀)矿,又因为所含铀矿资源材料少,本文主要讲其金矿特征,故本文中简称为兰德砾岩型金矿。兰德盆地呈北东向狭长的椭圆形展布,北东向延伸 350km,北西向宽约 300km,盆地面积约 100000km^2。

威特沃特斯兰德盆地边缘主要包括有 8 个金矿田,即东部兰德(East Rand)、南部兰德(South Rand)、中部兰德(Central Rand)、西部兰德(West

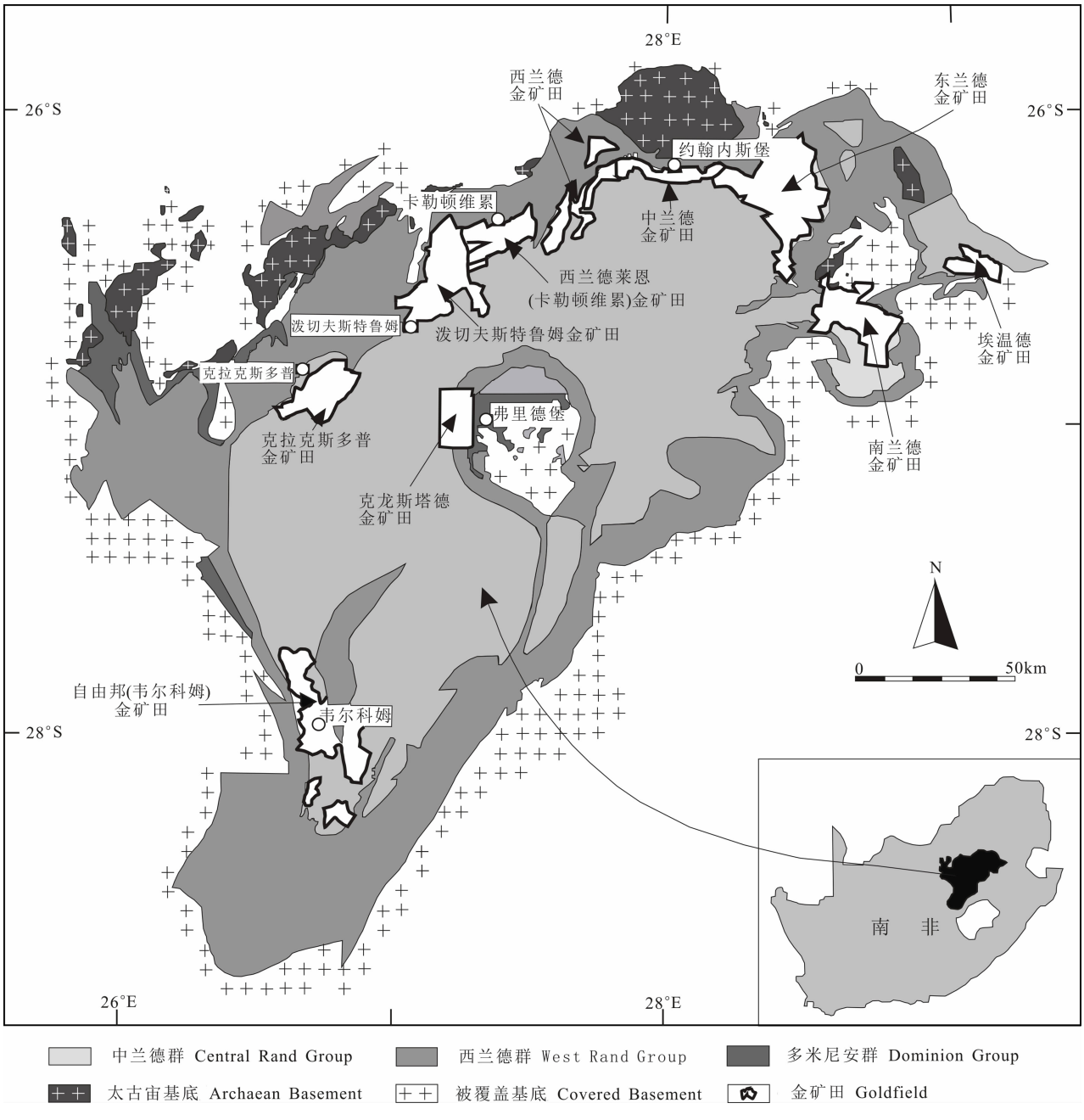


图 2 威特沃特斯兰德盆地地质图(引自 Dankert et al. ,2010)

Fig. 2 Schematic geological map of the Witwatersrand Basin(after Dankert et al. ,2010)

Rand)、Wits Line 西部,克莱克斯多普(Klerkdorp)、卡勒顿维累(Carlitonville)、自由邦省 (维尔科姆)和埃温德(Evander)金矿田(图 2),总计有 100 多个金矿床,其中已生产出黄金 900t 以上的 9 个超大型金矿床分别是:Driefountain(属卡勒顿维累金矿田)、Crown Mine(中部兰德金矿田)、ERPM(中部兰德金矿田)、Vaal Reefs(克勒克多普金矿田)、Eastern Holdings(韦尔科姆金矿田)、Western Deep Levels(卡勒顿维累金矿田),Blybaoruitzicht(卡勒顿维累金矿田)、Free State Geduld(韦尔科姆金矿田)和 Government GM Areas(东部兰德)。

盆地的基底为斯瓦士兰超群和太古宙花岗岩组成的卡普瓦尔克拉通,砾岩型金矿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昂弗瓦特群和无花果树群、摩德斯群的岩石,太古宙的花岗质岩石广泛出露在盆地的外围和中部的弗里德堡(图 2)。盆地中沉积了巨厚的元古宙火山—沉积岩系,自下而上可分为多米尼安群、维特瓦

德斯兰德超群和文特斯多普超群(图 3),其中砾岩型金矿床主要产于威特沃特斯兰德超群中。威特沃特斯兰德超群的各地层出露差异较大,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。在岩石中细粒沉积物所占百分比低,这表明沉积作用形成于高能环境中。

陈毓川等(1995)认为兰德砾岩型金矿床位于太古宙火山沉积岩层序和花岗岩穹窿之间的下陷部分,盆地底部的形状影响着金矿床的沉积,使其呈现出河积扇或扇形三角洲的形状。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 在不同沉积旋回之间砂层中的不整合面上;④ 在泥层上的不整合面上;⑤ 在碳质层中的不整合面上,许多含金层在底部接触面上显著富集,但富集程度不一。

Dankert 和 Hero(2010)对兰德盆地的构造特征和大地构造演化史进行了较详细的评述,认为以前对兰德盆地构造特征的研究主要集中在 3 个方面:① 局部构造研究;② 金矿田尺度研究;③ 主要基于局部和金矿田尺度调查的区域尺度的构造历史综合研究。他们认为 Umzawami 和 Ukubambana 两个变形事件标志着兰德盆地和德兰士瓦盆地中沉积作用的结束,两个变形事件分别是 2.7Ga 和 2.2 ~ 2.0 Ga 褶皱逆冲带的演化,并且这些特征与超大陆旋回演化相关。中间阶段(即 2.7 ~ 2.2 Ga)特征至少包括 4 个盆地形成事件,其峰值分别位于 Klipriviersberg 群火山沉积层序、Platberg 群、Chuniespoort 群和 Pretoria 群的沉积层序中,其中形成于 Umzawami 变形事件期间(或较晚)的盆地建造促进了构造的相互作用(图 3)。

在区域上一些岩墙和岩床横切太古宙基底和威特沃特斯兰德超群、文特斯多普超群、德兰士瓦超群和卡鲁超群,并形成重要的地质时间标记(Ellis,1940;Grohmann, 1988)。它们与 Klipriviersberg 群的双峰式拉斑玄武岩—英安岩的侵位(Bowen et al. ,1986;约 2.72 Ga),布什维尔德(Bushveld)杂岩体中的镁铁质层状侵入体(约 2.06 Ga),Pilanesberg 杂岩体中的辉绿岩岩墙(约 1.3 ~ 1.1 Ga)以及形成卡鲁盆地泛流喷发玄武岩岩浆侵入通道的辉绿岩岩墙有关。

对兰德金矿田中的变质作用研究可追溯到上世纪初期(Young,1917),后来仅有 Phillips(1987)一直从事这项研究,直到上世纪 80 年代以后变质作用研究又得到人们的重视(Firmmel et al. ,2005)。Phillips(1989)研究了几乎所有的泥质层矿物成分,

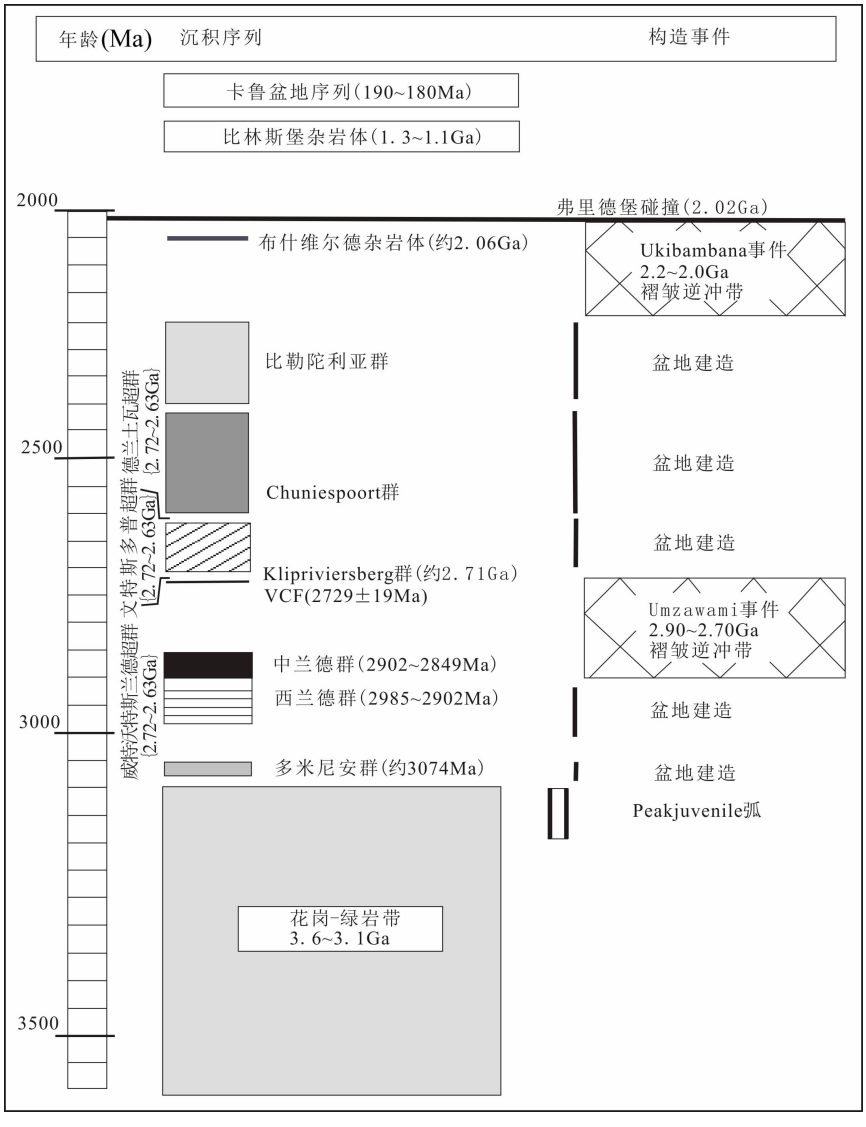


图 3 兰德盆地区域沉积事件和构造事件示意图(引自 Dankert et al. ,2010)

Fig. 3 Schematic events chart for deposition and tectonic events for the Witwatersrand basin (after Dankert et al. ,2010)

结果表明区域绿片岩相的变质事件曾经影响了每一个金矿,叶蜡石—硬绿泥石—绿泥石—白云母—石英—黄铁矿变质组合的温度为 350 ± 50℃,其压力约为 0.2 GPa。在渐进的变质作用时期,脱水反应产生含水流体相,其在整个盆地内以广泛的受压溶液,含水矿物和石英细脉的形式进行,并因此引起了大量元素的迁移。变质流体的迁移现象表现为不均匀的含金石英薄脉,而不是表现为整个过程中流体的流动特征,其中变质矿物组合与黄铁矿和含水流体保持平衡。Phillips(1989)认为总厚度为 2 km 的页岩(原含有 10% 的水,仅其中的 1% 析出,在 1 km^2范围内可排出 5000 万吨水),去水后可产生大量流体,变质温度比以往估计的温度要高得多,这在变质高峰期可引起金在流体中的迁移,因此兰德盆地的变质条件并不低于许多太古宙绿岩带的变质条件。

3.2 矿床成因

兰德盆地属于一个复式向斜,早期褶皱走向变化较大,晚期褶皱则为北西走向。Clendenin 等(1988)认为多米尼安群、维特瓦特斯兰德超群、文特斯多普群、德兰士瓦层序下部的沉积地层是代表一个单一的三阶段裂谷系统(时间在 3.0 ~2.5Ga 之间),该裂谷可能在 2.0 Ga 时再次活化。目前资料表明,该套沉积地层建造可能是裂谷系中热液沉积物。对于兰德砾岩型金矿床的成因长期以来有着争议,综合前人大量资料(Robb and Meyer,1985; Boyle,1989; Phillips,1989; Jolley et al. ,2004; Beach and Smith,2007; Phillips and Law,2000),作者将兰德盆地地区金矿床的成因模式归纳为两种:砂矿模式(Placer model;Robb and Meyer,1985)和热液模式(Hydrothermal Model; Phillips and Law,2000)。

3.2.1 砂矿模式(Placer model)

通过地质学和地球化学等方面研究,大多数学者支持砂矿模式(Placer model; Robb and Meyer, 1985;Boyle,1989;陈毓川等,1995),认为金最初是以细粒和质点(粉金)沉积于广阔的三角洲中(图 4)。对兰德金矿的矿源层问题曾有过长期的争论,砂矿模式认为金矿的分布受沉积学和岩性强烈控制,而热液论者则强调矿石矿物组合的次生特征。这个争论在 1967 年 Davison 逝世时得以平息,从那时起人们广泛的接受了砂矿模式。在这个模式中,原生的碎屑金具有它现在位置、成分以及在溶液中可有小规模的移动。Robb 和 Meyer (1985)详细讲解了砂矿模式,并且这个砂矿模式在后期的工作中也得到了验证。

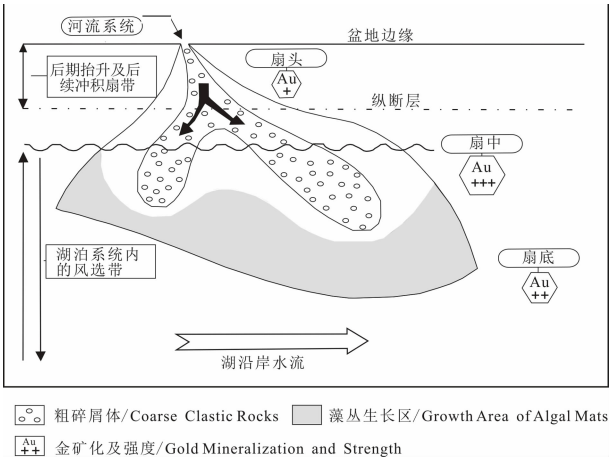


图 4 兰德盆地单扇三角洲砂金成矿模式(引自 Pretorius,1976)

Fig. 4 The placer model with a single fan delta of the Witwatersrand basin(after Pretorius,1976)

3.2.2 热液模式(Hydrothermal Model)

Jolley 等(2004)和 Beach 和 Smith(2007)的研究证明盆地中构造通道的存在性, Jolley 等(2004)对盆地尺度上的构造和金矿化作用之间的相互关系进行了广泛而细致的研究,认为构造和金矿化作用之间存在必然联系,也认为从微观至宏观尺度上逆冲构造通道对于金的热液再活化有促进作用。关于兰德金矿中金来源的问题,Phillips(1989)认为金在进入世界上最主要的太古代绿岩带金地层以前,就存在于兰德盆地中。变质条件、流体流量、流体通道、流体流动和金的溶解度足以在兰德超群的区域变质过程中引入金。Phillips 和 Law(2000)详细讲解的热液模式(Hydrothermal Model),认为兰德盆地中的大部分矿床经历了以下 3 个连续的矿化或再活化演化阶段(图 5)。

(1) 早期盆地阶段:在陆相裂谷时期多米尼安群沉积,接着地层发生坳陷,随后西兰德群早期地层开始沉积(图 5a)。

(2) 早期成岩阶段:挤压构造时期,多米尼安群时期伸展断层可能再活化,导致底部多米尼安群挤压并促使其沿盆地边缘隆起,大气降水沿盆地边缘隆起渗入地下,沿河流相沉积物通道进入并且进入部分固结的不整合面,盆地沉积作用和所经历的埋藏温压条件促使碳氢化合物的形成。这些流体的迁移受到盆地边缘变薄地层的强烈控制(图 5b)。

③金矿化阶段:Klipriviersberg 火山活动和快速

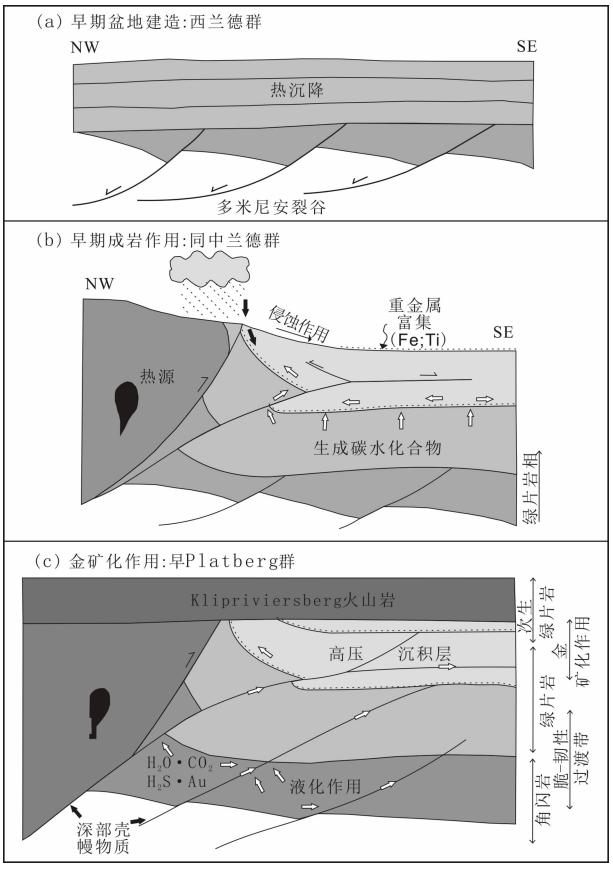


图 5 兰德金矿床的热液模式
(引自 Phillips et al. ,2000)
Fig. 5 The hydrothermal model of the Witwatersrand gold deposits(after Phillips et al. ,2000)

掩埋的火山堆代表威特沃特斯兰德沉积的终止,随之持续的逆断层变形与下部多米尼安群和镁铁质绿岩残留体的变质液化作用加剧了绿岩—角闪岩边缘的液化作用,使其释放水、硫、二氧化碳和金,并沿构造进入中兰德群变质岩中。Klipriviersberg 火山作用有利于变质的高压力流体沿着不透水层和脆—韧性断裂进入,进而碎屑铁氧化物的硫化作用和迁移的碳氢化合物的还原作用促使金的沉淀(图 5c)。

通过以上砂矿模式和热液模式的资料分析,这两种模式均具有层状矿体特征,并且 Au 可能具有相同来源即来源于早期的绿岩—角闪岩,其最大的不同点就是通过不同的运移方式形成矿体即砂矿模式是通过机械搬运沉积方式,而热液模式则以构造方式。就目前资料来看,笔者等倾向于早期以沉积模式为主,后期的构造作用可能使其进一步活化即砂矿模式和热液模式可能是代表了两个不同的矿化阶段。

4　巴伯顿绿岩带金矿床

4.1 矿床特点

南非巴伯顿地区金矿床主要分布于卡普瓦尔克拉通内的巴伯顿、穆奇森、彼德斯堡(Pietersburg)和萨瑟兰(Sutherlang)绿岩带内(图 6),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 个金矿床,其中 70% 的金产量来自希巴、新康索特、费尔维尤和艾格尼丝(Agnes)矿山,多数金矿产出在绿岩带的西北部,特别在 Jamestone 绿岩带、希巴山地区和摩德斯山地区(陈毓川等,1995;图 7)。

巴伯顿绿岩带代表着卡普瓦尔克拉通东部即南非和斯瓦士兰的一套太古代表壳岩层序,其出露面积 40 × 120 km,北东走向,岩性为 3.55 ~ 3.22 Ga 的火山岩和碎屑岩,被花岗片麻岩穹窿(3.5 ~ 3.1 Ga)包围(Lowe and Byerly,2007;图 7)。



图 6 卡普瓦尔克拉通中的绿岩带位置(引自高坪仙,1995)
Fig. 6 The Greenstone Belt location of the Kaapvaal Craton(after Gao Xianping,1995)

巴伯顿绿岩带的构造是一种北北东—北东东走向的向斜构造,因此该绿岩带存在与卡普瓦尔克拉通许多其他太古宙绿岩带构造相似的方向。在这种宽阔的向斜状构造中,有许多紧闭的陡倾的向斜褶皱经常发生倒转,其两翼被主要的走向断层或滑动

断层分割,结果斯瓦士兰超群被分成许多狭窄的北东东走向部分,Anhaeusser 和 Wilson(1981)认为其中许多断层显示了活化的证据,并且证实有许多脱顶褶皱和挤离构造。

在巴伯顿绿岩带的北西翼以及南西翼出现不同大小的花岗岩底辟侵入体,其可能对于宽缓的区域构造演化起着重要的作用。

Anhaeusser 和 Wilson(1981)认为变质作用主要是在昂弗瓦特火山岩组合中,并且已经接受了广泛的区域变质作用,在少数地方经受了热动力和接触变质作用,存在广泛的变质岩类特征。变质分带包括花岗岩和伟晶岩附近的角闪岩相,远离接触带变为绿片岩变质作用的各亚相。在与年轻花岗岩接触部位出现变质晕叠生特征,以及出现双峰式特征的矿物相和缺乏蓝片岩矿物等特征,因此可把这种环境区别于后期的地质时代环境。

对于巴伯顿地区金矿的成矿年龄研究,Dziggel 等(2010)测得新康索特金矿床的成矿年龄为 3027 ±7.5 Ma,de Ronde 等(1992)测得费尔维尤矿床成矿年龄约为 3084 Ma。Dirks 等(2013)给出新康索特金矿床和希巴矿床成矿年龄约为 3015Ma。因此,推断绿岩带中金成矿的主要年龄是 3084 ~3015Ma。

4.2 矿床成因

巴伯顿地区金矿床是赋存于太古宙绿岩带中的石英脉或剪切带型金矿床,许多人试图通过变质阶段、母岩类型、构造背景、相关侵入关系和流体类型等将石英脉或剪切带型金矿床划分清楚,并且把绿岩带型金矿床简单地分为两类(不包括冲积和氧化矿床):a 在剪切带中的含易汞齐化金的石英脉型金矿床;b 浸染硫化物型金矿床(Anhaeusser,1986; Ward, 1999)。Dirks 等(2009)和 Munyai 等(2011)展示了巴伯顿绿岩带中希巴地区金成矿作用沿着绿岩带增生后期的伸展构造出现。de Ronde 等(1992)观察了巴伯顿绿岩带中大量与金矿床有关的矿化流体化学特征,认为其特征类似并且来源也相同。虽然许多学者对于该地区矿床模式均有研究(Anhaeusser, 1983; de Ronde et al., 1992; Ward, 1999; Munyai et al.,2011),但总的来说,解释巴伯顿地区金矿床的成矿模式主要有三种重要的模式,分别是火山模式(Volcanogenic Model; Anhaeusser, 1983)、转换滑脱构造模式(Transtensional Tectonics Model; Dziggel et al., 2010)和构造交叉模式(Intersections Model; Paul et al.,2013)。

4.2.1 火山模式(Volcanogenic Model)

通过对巴伯顿地区重力等值线图等资料的认识,Anhaeusser(1983)对火山模式(Volcanogenic Model)进行了详细说明,他认为该地区基底存在硅镁质穹窿,并且经历了许多非常复杂的构造演化阶段。在早期大尺度硅镁质岩石圈的重力不稳定作用下早期的火山机构塌陷,并导致较早期的火山—沉积层序变形;接着重力作用再次诱发变形,促使了向斜和陡峭的南北向倾斜断层等的形成,进而产生复向斜;绿岩带底部的花岗岩向上入侵再次促使其变形,并且在绿岩带中形成许多花岗岩底辟构造,同时认为这些英云闪长岩和奥长花岗岩岩体可能是来源于高镁科马提质玄武岩的部分熔融体。在底辟花岗岩作用下成矿热液沿着构造上移,并且在构造带中形成矿体。

4.2.2 转换滑脱构造模式(Transtensional Tectonics Model)

在对研究区详细构造填图的基础上,Dziggel 等(2010)将该矿山地区的构造演化概括为转换滑脱构造模式(Transtensional Tectonics Model),其可划分为具有三个不同年龄的变形阶段:① D_1变形阶段是一个区域性的、以向南倾斜构造为特征,并且形成于金矿化作用之前;② D_2变形阶段是金矿化的主要阶段,金矿化与局部 D_2变形期间的早期构造的再次韧性变形和再活化有关,其同样以存在大量同期伟晶岩脉为特征,但是可能同样沿着其边缘被褶皱或糜棱岩化,这表明在其侵位时期经历了连续的剪切作用(Otto et al., 2007)。测得伟晶岩中石榴子石的 Rb - Sr 和 Sm - Nd 年龄约为 3040Ma (Harris et al., 1993),该年龄相对于费尔维尤矿山绿片岩相内金矿化有关的热液金红石确定的 3084 ±18Ma 的年龄要小(de Ronde et al.,1991),因此其可能代表了新康索特内金矿化的较小年龄;③ D_3阶段是最晚期的局部构造事件,且以横切早期构造的晚期脆性正断层为特征(Otto et al.,2007)。

4.2.3 构造交叉模式(Intersections Model)

Paul 等(2013)给出该地区的增生变形时间是在 3261 ±21 Ma 至 3100 ±18 Ma 之间,并且认为该地区的金成矿时期是伴随着威特沃特斯兰德盆地和蓬戈拉(Pongola)盆地的开启,火成岩活动伴随有金成矿的出现。巴伯顿绿岩带复杂的地下地质特征被有规律性的剪切带所截断,它促使深部的流体不断进入,流体的进入发生在伸展过程中并且与酸性岩浆活动有关,并且最富的矿石出现在较老的和较年

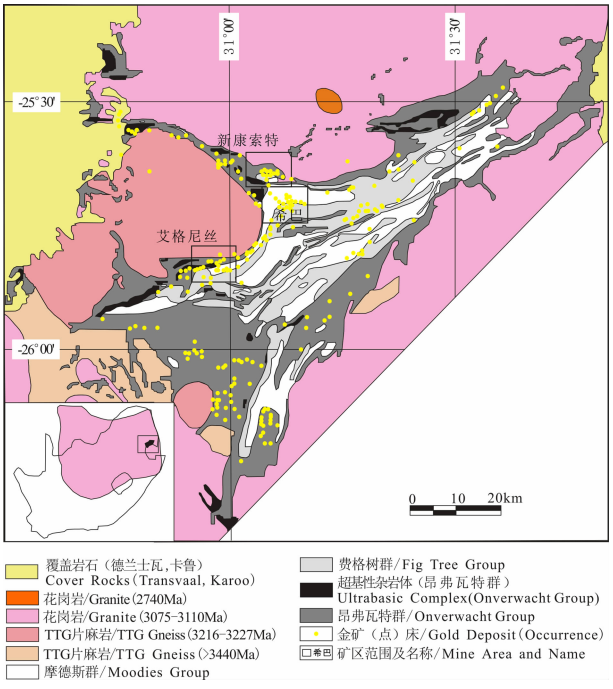


图 7 巴伯顿绿岩带中金矿床分布图
（引自 Dirks et al. ,2013）

Fig. 7 The gold deposits map of the Barberton Greenstone Belt (after Dirks et al. ,2013)

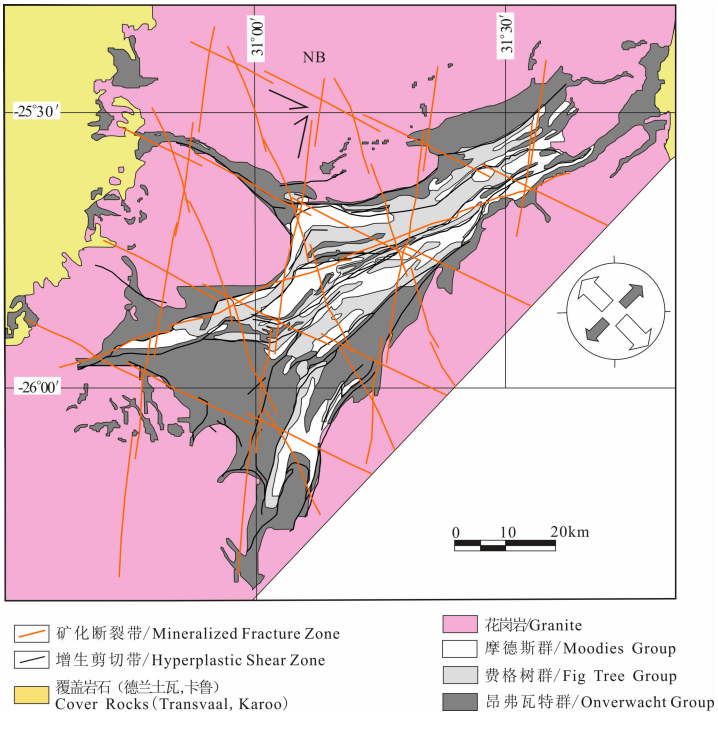


图 8 巴伯顿绿岩带的金矿构造交叉模式
（引自 Dirks et al. ,2013）

Fig. 8 Gold mineralisation structure intersection model of the Barberton Greenstone Belt (after Dirks et al. ,2013)

轻的构造交汇点附近即构造交叉成矿模式(Intersections Model,图 8)。在该模式中,巴伯顿绿岩带增生地质体之下的杂岩体被一系列规则样式的剪切带切割,这些剪切带起源于允许深部流体进入的足够深度内。伴随着伸展作用,在岩浆活动(Igneous Activity)所驱使下,这时脆性—韧性剪切带以一个规则的、可见的方式形成,流体可能主要集中在沿着剪切带的交叉处和剪切带与某种岩石或下伏地质体内的构造交叉处流入。

流体及相关的侵入体起源于深部,可能来自于地幔(de Ronde et al. ,1992),绿岩带规模的伸展断裂通道的分布可能反映成矿物质属于深部地壳来源并且与控制金伯利岩侵位的构造通道具有相似的性质(Jelsma et al. ,2004)。横切巴伯顿绿岩带的构造主要年龄约为 3.0Ga,北西走向的铁镁质岩脉群(Ward,1999)可能是矿化期间流体进入断裂带的另外一种表现方式(Anhaeusser,1986)。

因此,在深部构造裂隙、交叉网状脆性—韧性剪切带及约 3015 Ma 时期的热液流体等因素的共同影响下,较大的矿床可能恰好位于绿岩带内的构造交叉部位成矿(Dirks et al. ,2013)。

通过以上火山模式、转换滑脱构造模式和构造交叉模式的资料分析,这三种模式均与岩体有关,构造控矿特征明显,并且成矿流体均可能来源深部,其最大的不同点是对矿体的赋存部位描述不同即由火山模式→转换滑脱构造模式→构造交叉模式描述矿体的赋存部位是一个由粗到具体的过程。就目前资料来看,作者认为这三种模式本质上是相通的,只是侧重点不同而已。

6　存在的主要问题

(1)矿床成因研究方面:无论是对南非东北部兰德盆地上的砾岩型金矿还是绿岩带型金矿,其成因均存在不同认识,尤其是对绿岩带型矿床,尽管越来越多的证据显示热液活动参与了成矿,并且可能是成矿的主导因素,但仍需要继续深入研究,以便揭示绿岩带金矿床形成的真正机理。砾岩型金矿虽然多数学者同意砂矿成因,但是在给定合理的流体迁移距离和矿源层方面,直到现在都存在疑问。

(2)找矿模式方面:由于南非东北部兰德盆地上的金矿床中局部含有磁铁矿,虽局部可应用其磁性特征来找矿,但是对于大多数地区

向更深部位的找矿工作难度较大。对于东北部绿岩带型金矿,虽然建立了金矿成矿模式,但是还是需要在这些模式指导下做进一步细节上的研究。

参 考 文 献 / References

陈毓川, 沈保丰, 蔡文彦, 朱明玉, 其和日格. 1995. 南非矿山考察简况. 国外前寒武纪地质, (2): 1~18.

高坪仙. 1995. 南非彼得斯堡绿岩带及林波波带南部边缘区的地质特征及其构造关系. 国外前寒武纪地质, (3): 63~69.

李上森. 1996. 南非卡普瓦尔地块的构造演化. 国外前寒武纪地质, (1): 39~42.

刘晓峰. 2013. 2012 年我国黄金消费量达到 832.18 吨,同比增长 9.35%[OL]. [2014-04-10] http://news.xinhuanet.com/fortune/2013-02/17/c_114702501.htm

佚名. 2011. 中国黄金储量全球第三[OL]. [2014-04-10]. http://epaper.nfdaily.cn/html/2011-06/01/content_6967427.htm

中国黄金协会. 2013. 2013 年上半年我国黄金消费量 706.36 吨 同比增长 53.7%[OL]. [2014-04-10] http://www.cngold.org.cn/newsinfo.aspx? ID=932

Anhaeusser C R. 1981. The geology and evolution of the Barberton Mountain Land. In: Anhaeusser C R(Editor), Barberton Excursion Guidebook —— Archaean Geology of the Barberton Mountain Land. Geological Society of South Africa, Johannesburg: 1~21.

Anhaeusser C R and Wilson J F. 1981. Chapter 8 —— The Granitic Gneiss Greenstone Shield. Precambrian of the Southern Hemisphere, 2: 423~499.

Anhaeusser C R. 1983. Structural elements of Archaean granite—greenstone terranes as exemplified by the Barberton Mountain Land, South Africa (unpubl.). University of the Witwatersrand, Johannesburg. Information circular 162: 1~22.

Anhaeusser C R. 1986. Archaean gold mineralization in the Barberton Mountain land. In: Anhaeusser C R, Maske S(Eds.), Mineral Deposits of Southern Africa. Geological Society of South Africa, Johannesburg, 1: 359~375.

Armstrong R A, Compston W, Retief E A, Williams I S and Welke H J. 1991. Zircon ion microprobe studies bearing on the age and evolution of the Witwatersrand triad. Precambrian Research 53: 243~266.

Beach A and Smith R. 2007. Structural geometry and development of the Witwatersrand Basin, South Africa. In: Ries A C, Butler R W H, Graham R H(Eds.), Deformation of the Continental Crust: The Legacy of Mike Coward. Special Publications. Geological Society, London: 533~542.

Begg G C, Griffin W L, Natapov L M, O'Reilly S Y, Grand S P, O'Neill C J, Hronsky J M A, Poudjom Djomani Y, Swain C J, Deen T and Bowden P. 2009. The lithospheric architecture of Africa: seismic tomography, mantle petrology and tectonic evolution. Geosphere 5: 23~50.

Beukes J N. 1990. Interaction of Fluvial and Marine Sedimentary Processes in the Formation of Some Kerosene—Bearing Auriferous Palaeoplacers of the Witwatersrand Supergroup. Department of Geology, Rand Afrikaans University: 46~49.

Bjinse T Dankert and Kim A A Hein. 2010. Evaluating the structural character and tectonic history of the Witwatersrand Basin. Precambrian Research, 177: 1~22.

Bowen T B, Marsh J S, Bowen M P and Eales H V. 1986. Volcanic rocks of the Witwatersrand triad, South Africa. I. Description, classification and geochemical stratigraphy. Precambrian Research 31: 297~324.

Boyle R W. 1987. Gold History and Genesis of Deposits. Van Nostrand Reinhold, New York: 676.

Brandl G, Cloete M and Anhaeusser C R. 2006. Archaean Greenstone Belts. In: Johnson M R, Anhaeusser C R, Thomas R J(Eds.), The Geology of South Africa. Geological Society of South Africa and Council for Geoscience Publication, Pretoria: 9~56.

Burke K, Kidd W S F and Kusky T M. 1986. Archean foreland basin tectonics in the Witwatersrand, South Africa. Tectonics 5: 439~456.

Byerly G R, Kröer A, Lowe D R, Todt W and Walsh M M. 1996. Prolonged magmatism and time constraints for sediment deposition in the early Archaean Barberton greenstone belt: evidence from the Upper Onverwacht and Fig Tree Groups. Precambrian Research 78: 125~138.

Catuneanu O. 2001. Flexural partitioning of the late Archaean Witwatersrand foreland system, South Africa. Sedimentary Geology. 141~142: 95~112.

Vorster C J. 2005. Simplified geology, selected mines and mineral deposits South Africa, Lesotho and Swaziland. 2005 Edition, 1:4 000 000 scale map, Geoscience South African.

Clendenin C W, Charlesworth E G and Maske S. 1988. An early Proterozoic three-stage rift system, Kaapvaal Craton, South Africa. Tectonophysics, 145: 73~86.

de Ronde C E J, Kamo S, Davis D W, de Wit M J and Spooner E T C. 1991. Field geochemical and U-Pb isotopic constraints from hypabyssal felsic intrusions within the Barberton greenstone belt, South Africa: implications for tectonics and the timing of gold mineralization. Precambrian Research 49: 261~280.

de Ronde C E J, Spooner E T C, de Wit M J and Bray C J. 1992. Shear zone related, Au quartz vein deposits in the Barberton greenstone belt, South Africa: field and petrographic characteristics, fluid properties, and light stable isotope geochemistry. Economic Geology 87: 366~402.

de Ronde C E J and de Wit M J. 1994. The tectonic history of the Barberton greenstone belt South Africa: ~490 million years of Archaean crustal evolution. Tectonics13: 983~1005.

Ellis J. 1940. An intrusion of quartz dolerite occurring in the Far East Rand, Transvaal. Transactions of the Geological Society of South Africa 43: 127~142.

Dirks P H G M, Charlesworth E G and Munyai M R. 2009. Cratonic extension and Archaean gold mineralisation in the Sheba—Fairview mine, Barberton Greenstone Belt, South Africa. South African Journal of Geology 112: 291~316.

Mossman D J and Dyer B D. 1985. The geochemistry of Witwatersrand-type gold deposits and the possible influence of ancient prokaryotic communities on gold dissolution and precipitation. Precambrian Research. 30(4): 303~319.

Duncan A R and Marsh J S. 2007. The Karoo Igneous Province. In: Johnson M R, Anhaeusser C R, Thomas R J (Eds.), The Geology of South Africa. Geological Society of South Africa/Council for Geoscience, Johannesburg, Pretoria: 501~520.

Dziggel A, Poujol M, Otto A, Kisters A F M, Trieloff M, Schwarz W H and Meyer F M. 2010. New U-Pb and Ar^{40}/Ar^{39} ages from the northern margin of the Barberton greenstone belt, South Africa: implications for the formation of Mesoarchaean gold deposits.

Precambrian Research, 179: 206 ~ 220.

Frimmel H E, Groves D I, Kirk J, Ruiz J, Chesley J and Minter W E L. 2005. The formation and preservation of the Witwatersrand Goldfields, the World's Largest Gold Province. In: Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J, Richards J P(Eds.), Economic Geology 100th Anniversary Volume. Society of Economic Geologists, Littleton, CO: 769 ~ 797.

Frimmel H E. 2008. Earth's continental crustal gold endowment. Earth and Planetary Science Letters 267: 45 ~ 55.

Goldfarb R J, Baker T, Dubé B, Groves D I, Hart C J R and Gosselin P. 2005. Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes. Economic Geology 100th Anniversary Volume: 407 ~ 450.

Grohmann G. 1988. Faulting and Dyking in the Mines of the Central Rand Goldfield. Information Circular 204. Economic Geology Research Unit, University of the Witwatersrand, Johannesburg: 39.

Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, Hagemann S G and Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. Ore Geology Reviews13: 7 ~ 27.

Hall A L. 1918. The geology of the Barberton gold mining district. Memoir Geological Survey South Africa9: 347.

Harris P D, Robb L J and Tomkinson M J. 1995. The nature and structural setting of rare-element pegmatites along the northern flank of the Barberton greenstone belt, South Africa. South African Journal of Geology, 98: 82 ~ 94.

Hofmann A. 2005. The geochemistry of sedimentary rocks from the Fig Tree Group, Barberton greenstone belt: implications for tectonic, hydrothermal and surface processes during mid-Archaean times. Precambrian Research 143: 23 ~ 49.

Jelsma H A, de Wit M J, Thiart C, Dirks P H G M, Viola G, Basson I J and Anckar E. 2004. Preferential distribution along transcontinental corridors of kimberlites and related rocks of Southern Africa. South African Journal of Geology 107: 301 ~ 324.

Jolley S J, Freeman S R, Barnicoat A C, Phillips G M, Knipe R J, Pather A, Fox N P C, Strydom D, Birch M T G, Henderson I H C and Rowland T W. 2004. Structural controls on Witwatersrand gold mineralisation. Journal of Structural Geology 26: 1067 ~ 1086.

Kamo S L and Davis D W. 1994. Reassessment of Archaean crustal development in the Barberton Mountain Land, South Africa, based on U-Pb dating. Tectonics 13: 167 ~ 192.

Kerrich R, Goldfarb R J, Groves D I and Garwin S. 2000. The geodynamics of world-class gold deposits: characteristics, space-time distribution, and origins. In: Hagemann S G, Brown P E (Eds.), Gold in 2000. Reviews in Economic Geology, 13. Society of Economic Geologists, Boulder, Colorado: 501 ~ 551.

Kositcin N, McNaughton N J, Griffin B J, Fletcher I R, David I, Groves D I and Birger Rasmussen B. 2003. Textural and geochemical discrimination between xenotime of different origin in the Archaean Witwatersrand Basin, South Africa. Geochimica et Cosmochimica Acta 67: 709 ~ 731.

Kositcin N and Krapež B. 2004. Relationship between detrital zircon age —— spectra and the tectonic evolution of the Late Archaean Witwatersrand Basin, South Africa. Precambrian Research 129: 141 ~ 168.

Kröner A, Hegner E, Byerly G R and Lowe D R. 1992. Possible terrane identification in the early Archean Barberton greenstone belt, South Africa, using single Zircon geochronology. EOS 73: 616.

Lana C, Gibson R L and Reimold W U. 2006. The Broodkop shear zone, southeast Vredefort dome (South Africa): a Dominion-related extensional feature?. South African Journal of Geology 109: 265 ~ 278.

Lowe D R and Byerly G R. 2007. An overview of the geology of the Barberton greenstone belt and vicinity: implications for early crustal development. In: Van Kranendonk M J, Smithies R H, Vickie C B (Eds.), Earth's Oldest Rocks. Development in Precambrian Geology, 15. Elsevier, Amsterdam: 481 ~ 524.

Mayer J J and Albat H M. 1990. An appraisal of the significance of small-scale fold structures in the contorted bed of the area of the Vredefort. South African Journal of Geology 93: 311 ~ 317.

Mc Carthy T S. 2006. The Witwatersrand Supergroup. In: Johnson M R, Anhaeusser C R, Thomas R J (Eds.), The Geology of South Africa. Geological Society of South Africa. Johannesburg/Council for Geoscience, Pretoria: 155 ~ 186.

Mellor E T. 1917a. Geological Map of the Witwatersrand Goldfield. Geological Survey of South Africa, Pretoria.

Mellor E T. 1917b. The Geology of the Witwatersrand. An Explanation of the Geological Map of the Witwatersrand Goldfield. Special Publication, Pretoria: 46.

Mossman D J, Minter W E L, Dutkiewicz A, Hallbauer D K, George S C, Hennigh Q, Reimer T O and Horscroft F D. 2008. The indigenous origin of Witwatersrand" carbon". Precambrian Research. 164: 173 ~ 186.

Munyai M R, Dirks P H G M and Charlesworth E G. 2011. Archaean gold mineralization during post-orogenic extension in the New Consort Gold Mine, Barberton Greenstone Belt, South Africa. South African Journal of Geology 114: 121 ~ 144.

Otto A, Dziggel A, Kisters A F M and Meyer F M. 2007. The New Consort Gold Mine, Barberton greenstone belt, South Africa: orogenic gold mineralization in a condensed metamorphic profile. Mineralia Deposita 42: 715 ~ 735.

Paul H G M Dirks, Charlesworth E G, M Richard Munyai and Richard Wormald. 2013. Stress analysis, post-orogenic extension and 3.01 Ga gold mineralisation in the Barberton Greenstone Belt, South Africa. Precambrian Research 226: 157 ~ 184.

Poujol M, Robb L J, Anhaeusser C R and Gericke B. 2003. A review of the geochronological constraints on the evolution of the Kaapvaal Craton, South Africa. Precambrian Research 127: 181 ~ 213.

Phillips G N. 1987. Metamorphism of the Witwatersrand goldfields: conditions during peak metamorphism. J Metam Geol 5: 307 ~ 322.

Phillips G N. 1989. Metamorphism of the witwatersrand Gold Field: Conditions during Peak Metamorphism ISSG, Shen Yang China: 445 ~ 460.

Phillips G N and Law J D M. 2000. Witwatersrand gold fields: geology, genesis, and exploration. Society of Economic Geology Reviews 13: 439 ~ 500.

Howarth R J. 2012. A petrologist in South Africa: Frederick Henry Hatch and the Witwatersrand Goldfield. Proceedings of the Geologists´Association, 123: 189 ~ 209

Robb L J and Meyer F M. 1985. The Nature of the Witwatersrand Hinterland: Conjectures on the Source-Area Problem. Information Circular 178. Economic Geology Research Unit, University of the Witwatersrand, Johannesburg. 25.

Pretorius D A. 1976. Gold in the Proterozoic sediments of South Africa: Systems, paradigms and models, in Wolf K. H., ed., Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits: Amsterdam. Elsevier. 7: 1

~27.

Boyle R W. 1989. Gold Deposits —— An Overview of Their Types, Geochemistry, Production And Crigin ISSG, Shen Yang China. 6 ~ 17.

Stanistreet I G, Mc Carthy T S, Charlesworth E G, Myers R E and Armstrong R A. 1986. Pre-Transvaal wrench tectonics along the northern margin of the Witwatersrand Basin. Tectonophysics 131: 53 ~74.

Stanistreet I G and Mc Carthy T S. 1991. Changing tectonosedimentary. Scenarios relevant to the development of the Late Archaean Witwatersrand Basin. Journal of African Earth Sciences. 13: 65 ~ 81.

Ward J H W. 1999. The metallogeny of the Barberton Greenstone Belt, South Africa and Swaziland. Council for Geoscience, Pretoria. Memoir 86: 108.

Young R B. 1917. The Banket —— A Study of the Auriferous Conglomerates of the Witwatersrand and the Associated Rocks. Gurney & Jackson, London: 125.

Review of Studies on the Gold Deposit – accumulated Area in South Africa

WANG Jie, REN Junping, HE Shengfei, XU Kangkang, LIU Xiaoyang, ZUO Libo, SUN Kai, GONG Penghui, HE Fuqing

Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin, 300170

Abstract: South Africa is one of the countries with the richest gold ore resources in the world. The gold deposits mainly occur in the northeast of the South Africa. Three types of gold ores have been recognized, which are: ① Witwatersrand conglomerate type gold deposits; ② granite greenstone belt type gold deposits; and ③ dolomite type gold deposits, with the former two types being the major ones in the region. Witwatersrand conglomerate type gold deposits are high grade, maximum deposits yield, large scale and very depth and are the most important types in South Africa. The genesis of the deposits is controversial. Two different models occur which include placer mode and thermal fluid model. According to the current data the writers think they represent two different mineralization stages. Granite greenstone belt type gold deposits mainly occur in the Barberton area which are large scale, easy mining and other characteristics, therefore which occupies an important position in the South African. The deposits are mainly hosted in quartz veins or shear zones. Three different models occur which include volcanogenic mineralisation models, inverted decollements modes and structure intersection model.

Key words: Witwatersrand conglomerate type gold deposits; granite greenstone belt type gold deposits; dolomite type gold deposits; ore genesis; Witwatersrand basin; Barberton area; South Africa