

澳大利亚卡尔古利高登麦尔世界级金矿床^{*}

江思宏 梁清玲

(中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

高登麦尔(Golden Mile)金矿床位于西澳珀斯(Perth)东约600 km的卡尔古利市附近,是目前所知的全球第三大金矿床(前两位分别为南非的兰德和乌兹别克斯坦的穆龙套),金储量约2000 t。它也被称为是世界上最大的太古宙造山型金矿床,其超级露天采坑(Super Pit)长达3.8 km,宽1.35 km,深500 m,是澳大利亚目前最大的露天黄金矿山。该矿床发现于1893年,至今已开采120年,其年开采量达8500万吨,其中有1200万吨为金矿石,其余为低品位矿石和废石,剥采比在5.5~6之间。随着该巨型金矿床的开发,一个新兴的矿业城市——卡尔古利在西澳崛起。该矿山目前由纽蒙特澳大利亚公司(Newmont Australia Pty Ltd)和巴里克澳大利亚太平洋公司(Barrick Australia Pacific)各持50%股份,由KCGM(Kalgoorlie Consolidated Gold Mines)负责矿山的生产管理。现在矿山每年生产85万盎司(约合26.4 t)黄金(Vielreicher et al., 2010)。由于所剩资源不多,只有870万盎司(约合270.6 t)的储量,因此,预计高登麦尔金矿将在2018年前后闭坑。

1 成矿环境

高登麦尔金矿床位于伊尔岗克拉通(Yilgarn craton)东部金矿田省(Eastern Goldfield Province)中部的绿岩带上。伊尔岗克拉通主要由花岗岩和花岗片麻岩组成,以及少量的表壳岩(绿岩带)(图1A)。这些表壳岩包括镁铁质-超镁铁质和长英质熔岩、沉积岩和镁铁质侵入岩,其形成时代为3600~2600 Ma。地震资料显示,绿岩带的厚度大约5~7 km,覆盖在长英质地壳上面,它们之间是一条大型的产状

近水平的拆离带。绿岩带的变质程度从绿片岩相到角闪岩相都有。

区域构造十分发育,主要为一些褶皱和大型走滑断层,具有多期发育的特点(从D1到D4)(Bate-man et al., 2004)。这些走滑断层是本区最为重要的控矿构造,区域上的主要金矿床基本上都沿着大型走滑断层分布(图1A)。

2 矿床地质

矿区内出露的地层从古到新有Hannans Lake蛇纹岩(2.71~2.70 Ga)、Kapai板岩[(2692±4 Ma)]、Devon Consols玄武岩、Paringa玄武岩[(2690±5 Ma)]和卡尔古利层序(Kalgoorlie Sequence)中的黑旗(Black Flag)组合页岩的长英质火山碎屑岩。上述这些岩石都被稍晚的辉绿岩岩席所侵入,其中包括对金矿化最为重要的高登麦尔辉绿岩,它沿Paringa玄武岩和卡尔古利层序的接触带侵位,厚达750 m,是许多金矿体的赋矿围岩。上述岩石都经历了褶皱和绿片岩相变质作用。矿区内脉岩分布广泛,主要为长石石英斑岩脉、钠长石-角闪石斑岩脉和煌斑岩脉。矿区内构造发育,主要是一些走滑和逆冲断层,金矿脉一般受次级构造控制。

金矿化产在韧性、脆韧性或脆性剪切带内,或者产在高登麦尔辉绿岩中的石英脉里,在Paringa玄武岩和黑旗组岩石里也可以见到少量含金石英脉。在5 km长、2 km宽、1 km深的矿区范围内共发现了2000多条金矿脉,均产在高登麦尔断层的两侧(图1B、C)。单个矿脉长30~1800 m,宽0.01~10 m,垂深30~1160 m。矿石金品位变化大,局部可达1250 g/t。

^{*} 本文得到中国地质大调查工作项目(1212011120325)资助

第一作者简介 江思宏,男,1968年生,研究员,主要从事金属矿床成矿规律研究。Email:jiangsihong1@163.com

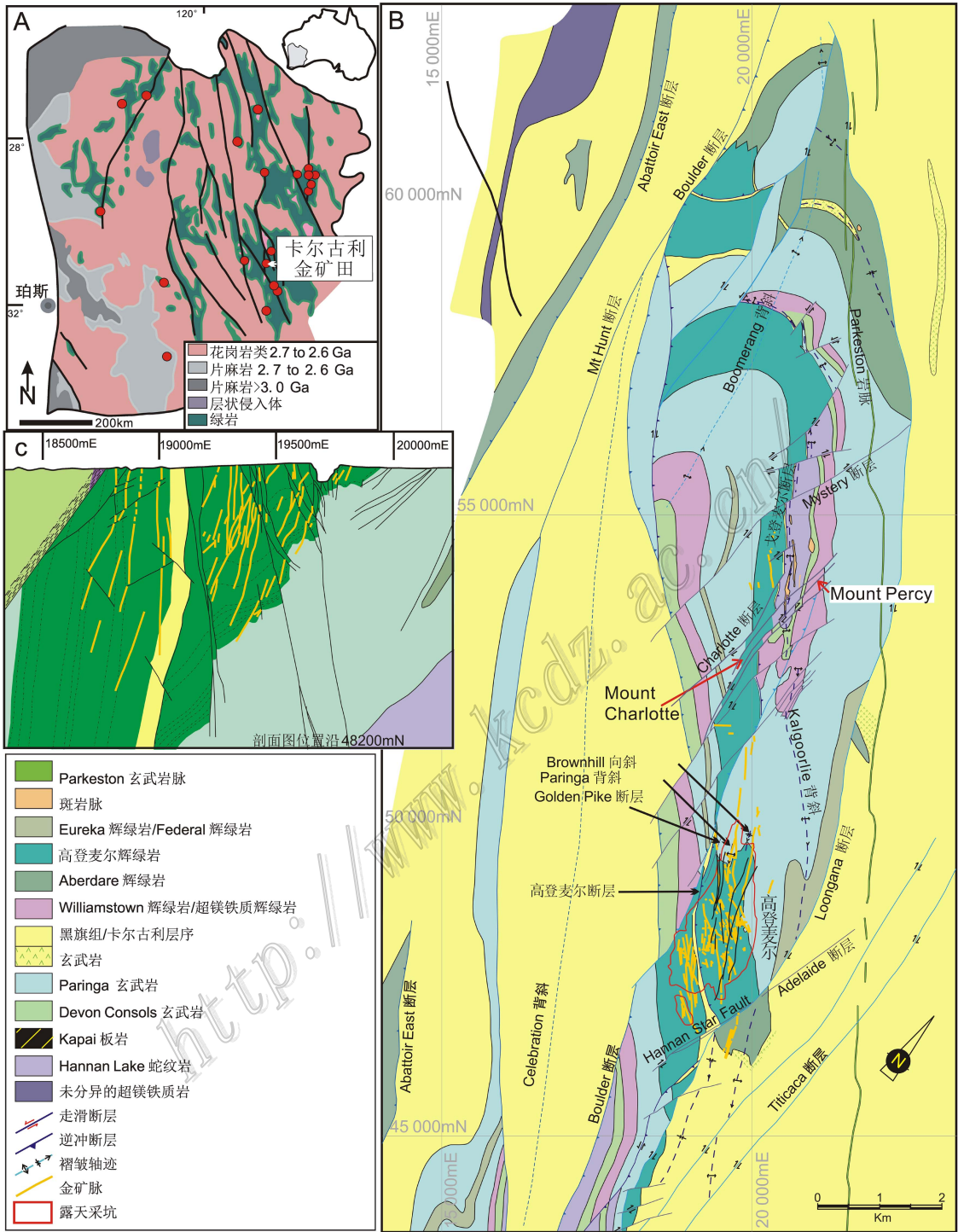


图 1 高登麦尔金矿地质简图(据 Vielreicher et al., 2010)

蚀变类型和强度与赋矿围岩的岩性和距离矿体的远近有关。远离矿体的蚀变为以绿泥石-方解石为主的矿物组合,它交代了区域变质作用形成的含阳起石的矿物组合;靠近矿体的含矿构造内的蚀变为铁白云石-菱铁矿-白云石-白云母组合。而在矿脉内,

蚀变通常为 1~5 m 宽的含有细粒黄铁矿-白云母-石英-铁白云石-白云石-菱铁矿-碲化物的面型硅化带,并伴有微角砾岩到超级碎裂岩和一些细脉,形成条带状和充填结构。矿石矿物复杂,除了常见的黄铁矿和金、银碲化物等矿物外,还含有少量的砷黝铜矿

、黝铜矿、黄铜矿、毒砂、闪锌矿和方铅矿,以及含 Hg、Ni、Pb 和 Sb 的碲化物,特别是在矿化较好部位,还出现含钒的白云母。因为含有大量金和银的碲化物,所以造成矿石较为难选。金可以呈自然金或者含金的碲化物以粒状分散在细粒碳酸盐(铁白云石、白云石、菱铁矿)、石英、白云母和电气石中。在黄铁矿中可以呈包裹金或裂隙金等“不可见金”产出。在矿脉中,金品位高低与黄铁矿和碲化物含量有关。

上述这些矿脉通常被分为 3 种类型,分别是费米斯顿(Fimiston)型(又被称为高登麦尔型)、奥罗亚(Oroya)型和夏洛特(Charlotte)型,其中费米斯顿型最为重要,因为这种类型矿石的金含量占整个矿区金资源量的 70%,而其他两种类型金矿,即奥罗亚型和夏洛特型仅分别占 25% 和 5%。

费米斯顿型矿脉大约有 1000 余条,由 3 组不同走向(分别为 NW 向、NNW 向和 EW 向)的矿脉组成。矿脉通常长 1~2 km(最长 7 km),垂深 1.3 km,角砾状构造非常发育,裂隙胶结、条带状、环状、梳状和孔洞充填结构发育。矿石品位一般 10~15 g/t。矿石矿物主要为自然金、含金的含砷黄铁矿和 Au-Ag-Hg-Pb 碲化物。富矿体(w_{Au} 高达 1250 g/t)往往产出在不同方向的矿脉或者矿脉与未曾矿化的剪切带的交汇部位,并且向南或向北陡倾斜。

奥罗亚型矿脉均为高品位的“绿色标志层”(green leader)型矿体,以产出绿色钒云母、铁白云石、石英、黄铁矿、自然金和 Au-Ag 碲化物等矿物为特征,常沿着 Paranga 玄武岩与黑色页岩接触带处的膨大部位产出。矿石品位一般 15~1500 g/t。其典型实例是长达 1.5 km 的奥罗亚富矿体(Oroya Shoot),该矿脉产出了 60 多吨的黄金,其品位非常高,局部可达上万克/吨。

夏洛特型矿脉,在卡卡利金矿田北端的 Mt Charlotte 和 Mt Percy 矿区表现为大型席状石英脉,而在高登麦尔金矿区则呈一些石英网脉产出,并切穿了费米斯顿型矿脉。金主要产在蚀变围岩中,而席状脉通常是不含金的,矿石品位一般 5 g/t。白钨矿是这些席状脉的典型特征,通常产在石英脉里,其颗粒大小从 <1 mm 到 10 cm。

3 成矿作用

费米斯顿型和奥罗亚型金矿脉的成矿流体较为相似,均为 H_2O-CO_2 流体,低盐度($w(NaCl_{eq})$ 小于

6%) ,成矿温度 250~350℃,压力 100~200 MPa。与费米斯顿型流体相比,奥罗亚型流体 CH_4 的含量更高一些。夏洛特型矿脉的成矿流体也是 H_2O-CO_2 流体,低盐度($w(NaCl_{eq})$ 为 2%~5.5%) ,均一温度 264~360℃,压力 150~230 MPa。

Bateman 等(2004)根据构造解析研究结果,认为矿区构造与成矿之间的关系是:① D1 逆冲阶段,形成费米斯顿型金矿脉;② D2 逆断层作用,形成奥罗亚型金矿脉;③ D3 断裂作用,切割了费米斯顿型和奥罗亚型金矿脉;④ D4 断裂作用,形成了夏洛特型席状石英脉系统。造成高登麦尔金矿床巨量金堆积的主要原因是金的成矿作用贯穿于整个太古宙的造山作用期间,金矿化时间长达 45 Ma。长期活动的流体通道系统、大量不同性质的构造与地球化学圈闭、多种流体来源和沉淀机制共同造就了这个世界上最富的金矿床。而 Vielreicher 等(2010)根据热液独居石和磷钇矿的 U-Pb 测年结果认为,高登麦尔金矿床费米斯顿型、奥罗亚型和夏洛特型矿脉大体上是在 2.64 Ga 同时形成的,局部地方矿脉在 2.61~2.60 Ga 有成矿作用的叠加。而所谓根据构造穿切关系认为具有多期矿化,其实这种构造可能是因为在构造变形和成矿期间岩石发生的非均质流变引起,因为最新的年代学证据并不支持多期矿化的假说(Vielreicher et al., 2010)。但是也有疑问,就是卡卡利地区的金矿床是不是由同一种成矿作用形成的?还是这些不同类型的矿化,包括费米斯顿型、奥罗亚型和夏洛特型,是由不同的成矿作用在同一个空间里进行了几百万年的结果(Vielreicher et al., 2010)。

关于该矿床的成因,可以说是众说纷纭,到目前为止尚无定论。Phillips 等(1987)提出了变质交代模型;与其相反,Clout(1989)则认为属于与火山同期的浅成低温热液型金-碲化物矿床;Bateman 等(2004)提出了构造-热液模型,认为成矿与来自深部地壳演化的岩浆流体和变质流体有关。尽管如此,多数学者还是认为该矿床的成矿与本区晚太古宙造山作用有关,其成矿流体为变质流体(Boulter et al., 1987; Vielreicher et al., 2010)。

4 找矿模型

(1) 岩石标志:由于金矿的赋矿围岩通常为绿岩,即一些浅变质的基性或超基性火山岩,因此这些

岩石就成为找金的有利岩石标志；

(2) 构造标志：本区金矿脉的产出严格受剪切带的控制，这些剪切带被认为是最为有利的控矿构造，因此绿岩带地区的韧性剪切带就成为有利的找矿标志；

(3) 航磁异常标志：在伊尔岗克拉通，由于整个地区地表覆盖较厚，因此通过航磁测量发现线性构造，也可以被用来间接找矿；

(4) 化探标志：在地表露头相对较好的地区，化探异常（包括重砂异常），尤其是金的化探异常是寻找金矿的直接找矿标志。

5 初步结论

要形成高登麦尔这样一个金储量达 2000 t 的超大型金矿床，可能不是一种地质作用的结果，也不会是瞬间完成的，因为它不仅需要海量的成矿流体，而且还需要良好的流体运移通道、宽大的沉淀场所、持续不断驱动流体运移的动力，以及充足的时间等等，使得成矿物质得以大量沉淀、富集，因此我们认为它是由多种地质作用在一个地区较长时间耦合的结果。随着科学技术的不断进步和矿山地质研究工作

的不断深入，相信人们对这个超大型金矿床的成因认识也会不断深化，越来越接近真相。

参考文献/References

- Bateman R and Hagemann S. 2004. Gold mineralisation throughout about 45 Ma of Archaean orogenesis: Protracted flux of gold in the Golden Mile, Yilgarn Craton, Western Australia[J]. *Mineralium Deposita*, 39: 536-559.
- Boulter C A, Fotios M G and Phillips G N. 1987. The golden mile, Kalgoorlie: A giant gold deposit localized in ductile shear zones by structurally induced infiltration of auriferous metamorphic fluids[J]. *Econ. Geol.*, 82: 1661-1678.
- Clout J M F. 1989. Structural and isotopic studies of the Golden Mile goldtelluride deposit, Kalgoorlie[D]. W A unpublished Ph. D. thesis. Clayton, Australia, Monash University. 352 p.
- Phillips G N, Groves D I and Brown I G. 1987. Source requirements for the Golden Mile, Kalgoorlie: Significance to the metamorphic replacement model for Archean gold deposits[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 24: 1643-1651.
- Vielreicher N M, Groves D I, Snee L W, Fletcher I R and McNaughton N J. 2010. Broad synchronicity of three gold mineralization styles in the Kalgoorlie gold field: SHRIMP, U-Pb, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological evidence[J]. *Econ. Geol.*, 105: 187-227.