

蒙古博洛金矿床研究进展

陈龙^{1,2}, 赵元艺²

CHEN Long^{1,2}, ZHAO Yuanyi²

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

1. *China university of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;*

2. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

摘要:博洛(Boroo)金矿是蒙古国发现的首个岩金矿床,同时也是该国开采规模与黄金产量最大的金矿。该矿矿体主要产于博洛近水平断裂带内,整个矿化带(Au异常 $\geq 100 \times 10^{-9}$)长度超过2000m,宽度400m,局部厚度达100m,主要围岩为博洛花岗杂岩、变质沉积岩等。矿床主要矿化类型有金-硫化物、金-石英脉型矿化2种,与中国典型超大型造山型金山金矿具有较多相似点,判定其为造山型金矿。距博洛金矿35km处产出同类型且储量相近的大型金矿—盖特苏尔特(Gatsuurt)。在已有研究的基础上,从产出环境、地质特征、矿床成因等方面对其进行了介绍和总结,并在矿床邻区内划定3个找矿战略靶区,这对中国企业在蒙古寻找同类型金矿具有指导意义。

关键词:北肯特金矿带;造山型金矿;博洛金矿;蒙古

中图分类号:P618.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)01-0112-15

Chen L, Zhao Y Y. The progress in the study of the Boroo gold deposit in Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(1): 112-126

Abstract: The Boroo gold deposit, located in northern Khentei gold ore belt, is the first hard rock gold deposit discovered in Mongolia, and its scale of mining and the gold production are also the largest (averagely 3.52g/t gold, with total produced gold reaching 66t). The deposit is hosted in the Boroo fault, a nearly flat-lying fault zone. The total combined length of the mineralization zone (anomalous gold values ≥ 100 ppb) is more than 2500m, the width is at least 400m, and the thickness is locally as large as 100m. This area is underlain by granitoids of the Boroo Complex and metasedimentary rocks. Two main types of mineralization have been recognized in the Boroo gold deposit: the gold-sulfide type and the gold-quartz vein type. A comparison of the Boroo deposit with China's Jinchuan gold deposit shows that there exist many similarities between these two deposits, and hence the authors consider that the Boroo gold deposit is an orogenic gold deposit. Meanwhile, there is another large-sized gold deposit called Gatsuurt gold deposit 35km away from the Boroo deposit, which shares the same deposit type and equal ore reserves. On the basis of previous researches, the authors have made a detailed summarization in the aspects of production environment, geological characteristics, and genesis of the deposit. This paper provides useful information for Chinese companies' prospecting for the same type gold deposits; in addition, three strategic targets in the adjacent areas of Boroo have been delineated.

Key words: North Khentei gold ore belt; orogenic gold deposit; Boroo gold deposit; Mongolia

收稿日期:2016-05-23;修订日期:2016-07-01

资助项目:中国地质调查局项目《中蒙边境大型-特大型铜-金、铀和稀有金属矿集区对比研究》(编号:12120115066201)

作者简介:陈龙(1992-),男,在读硕士生,地质工程专业。E-mail: no1cl1992@163.com

通讯作者:赵元艺(1966-),男,博士,研究员,从事矿床学和地球化学研究。E-mail: yuanyizhao2@sina.com

1 概述

1.1 地理位置

博洛(Boroo)金矿位于蒙古国中北部的色楞格省巴彦高勒庙,地理坐标为北纬 $48^{\circ}44'38''$ 、东经 $106^{\circ}11'33''$,距乌兰巴托与俄罗斯南部国界线分别约110km、230km。与乌兰巴托-伊尔库茨克高速公路相距约3km,与色楞格省巴彦格尔苏木的巴伦哈拉火车站仅距20km,连接俄罗斯-蒙古-中国的蒙古铁路途经该站,距矿区最近的机场为乌兰巴托机场^[1-4]。矿区所在的北肯特造山带水资源丰富(造山带内有鄂尔浑及其下游的图拉河),电网发达,有火力发电厂及俄罗斯电网分布^[5]。

1.2 开发历史

蒙古的博洛金矿与宗莫德(Dzuun Mod)地区大多数金矿一样,以含金石英脉的形式产出。该矿于1910年发现,具悠久的开发历史^①,大致可分为5个阶段。

(1)1910—1964年:Mongolor公司于1910年成为首个发现博洛金矿石英脉及金矿床的公司,随后对博洛含金石英脉进行了工业开采。由于在第一次世界大战与苏联内战期,博洛金矿的生产设备和设施遭受抢劫或破坏,公司最后解体。之后对该矿床几乎没有进行地质与采矿活动,直到1933年才重新开始对金进行勘探,1942年开始建设用汞提取金的选矿厂,但在此后的23a内无生产记录。

(2)1965—1991年:东德-蒙古的地质队联合勘查发现,博洛矿床有成为大型金矿的潜力,并在1982—1990年对金矿储量进行了评估,但由于1991年德国统一,东德与蒙古的合作项目被叫停。

(3)1991—1994年:博洛矿床的矿权由蒙古政府和臣克努森黄金公司(简称MKE)合资控制,截止1992年,博洛共开采金超过28t;1994年MKE公司在对矿床储量估算过程中发现,硫化物严重影响了包括堆浸在内的选矿方法的进行,故放弃开采。

(4)1995—2000年:蒙古阿尔泰贸易有限公司获得采矿权,并于1997年转给由其与英国的亚洲矿业投资公司合资组成的博洛黄金公司(Boroo Gold Company,简称BGC),BGC公司与Resolute有限公司于1997年进行勘探工作,对6个露天采坑进行估算,共计达23t可回收金,平均品位 2.81g/t ;1998年,

Resolute公司下属子公司AGR公司(AGR Limited)经与BGC协议后控股85%,1999年对采坑围边进行矿化评估钻探,网度为 $40\text{m}\times 40\text{m}$,但因当时黄金市场低迷,矿山因此闲置。

(5)2001—2011年:Comeco黄金公司与博洛各控股公司协议后,开始建矿并于2004年投产,期间蒙古黄金有限公司施工约200个反循环钻孔确认储量。该公司于2004年更名为Centerra黄金公司并成为上市公司,占有博洛95%的股权。2005年,共开采黄金8.1t;2006年因蒙古民众干扰,采矿活动被拖延,共产出黄金8.0t;2007年,受矿山开采深度加大、矿石品位降低、选矿难度加大等因素影响,加之蒙古国对国家战略性矿床征收暴利税的政策出台等因素,当年共开采出黄金7.2t;2008—2009年,通过与政府协商暴利税收问题后,获得政府的短期矿石堆浸场使用许可,2008年开始对堆浸场进行建设,矿山2a内分别产出黄金5.5t、4.3t;2010—2011年,由于多方面原因,政府最终未批准对堆浸场的建设,使之闲置,矿床在2a内分别产出黄金3.2t、1.7t。

1.3 开发现状

目前,在博洛矿区进行矿业开采工作的是加拿大世纪黄金矿业公司(Centerra Gold Inc,简称CGI)。截止2011年,博洛金矿的露天开采(图版I-a)及堆浸采矿已停止,最深已到第12阶开采平台(纵深约100m)(图版I-b)。与此同时,该公司正着手开展距博洛金矿南东方向35km处的盖特苏尔特金矿床(Gatsuurt Gold Deposit,简称GGD)的勘查评价及采矿工作。目前,CGI拟在两矿床之间投资修建公路,计划将盖特苏尔特矿区的矿石运往博洛矿区的堆浸厂进行选矿^①。

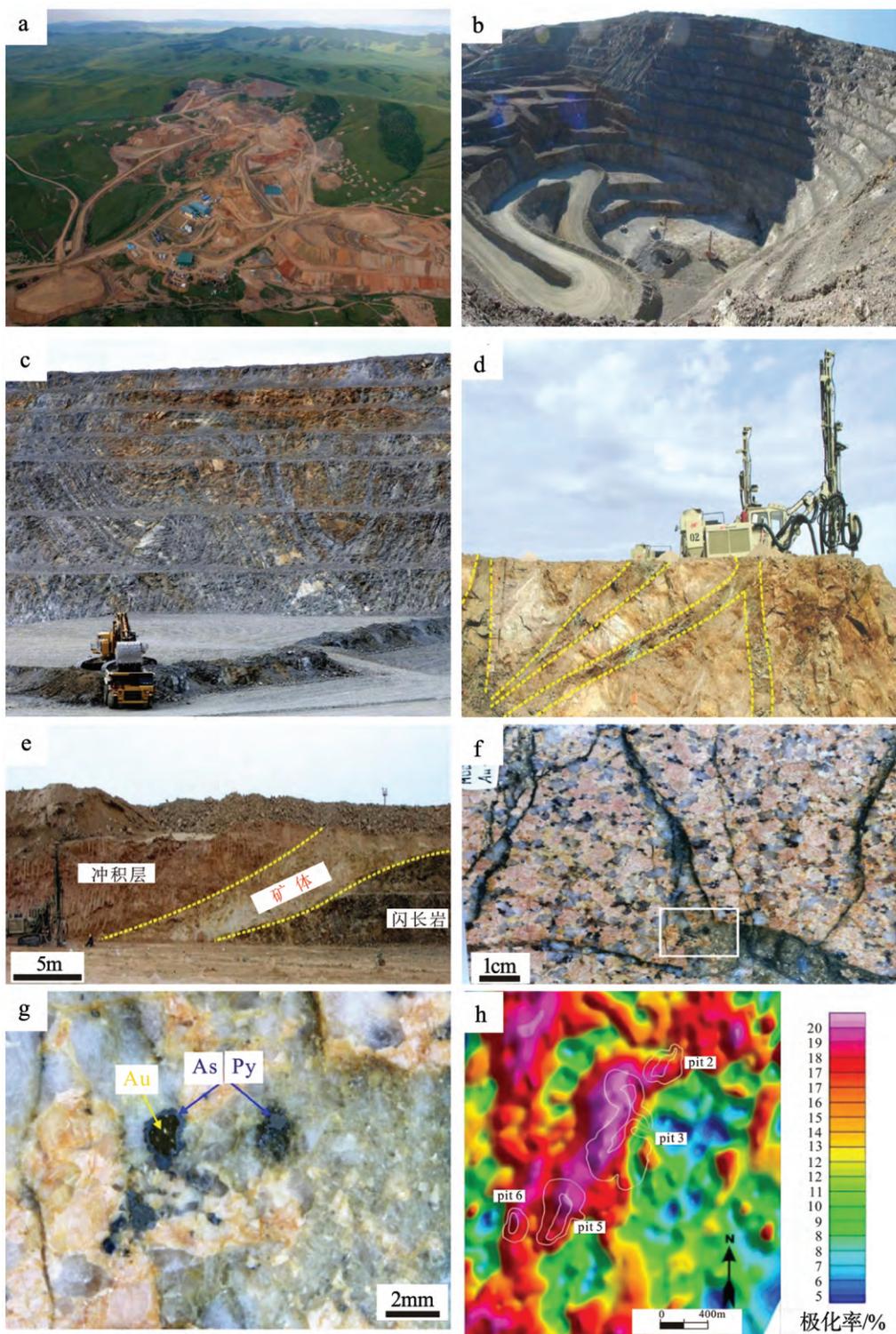
1.4 储量品位

据CGI公司提供的信息,博洛矿床在2001—2014期间的年储量、资源量和产量见图1。该矿床自有记录开采以来,共计产金 66t ^①;开采至2013年末(现已停止开采),矿山矿石的平均品位为 1.10g/t ,金资源量为 1.49t 。位于博洛附近的盖特苏尔特金矿床在CGI的勘查中发现,预计的Au平均品位可达 3.1g/t ,储量为 51t ^[5]。

1.5 研究意义

随着蒙古南部欧玉陶勒盖巨型铜-金矿床与白山特大型铜-锌矿床的发现,国际矿业界对该国矿产勘查、资源成矿理论等工作更加关注。蒙古发展

图版 I Plate I



a.矿区俯瞰图^①;b.采场全景图^②;c.哈拉组褶皱地层(5号采场西侧边坡)^①;d.马尾状构造(2号采场1095平台北西侧)^①;e.矿层出现于博洛断层内(2号采场东侧)^①;f.岩心照片(5号采区钻孔)^①;g.图f白方框放大后照片^①;h.博洛激电异常图像^①。

As—毒砂;Py—黄铁矿^①;Au—金

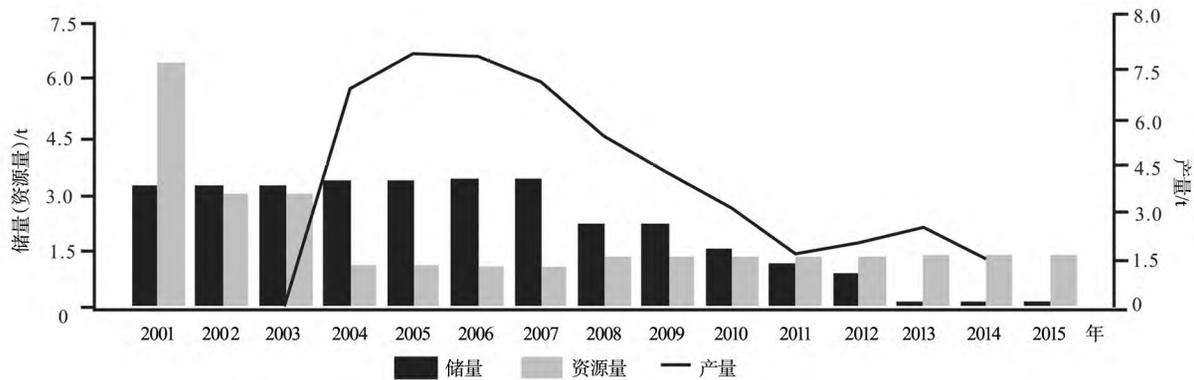
图1 博洛金矿床金储量资源量和产量变化^②

Fig. 1 The variation of reserves/resources and production of the Boroo gold deposit

依赖于矿产品出口,其创造的价值占整个国家贸易收入的70%,其中黄金矿产的重要出口对象有中国、加拿大、美国、英国。其中中国作为蒙古的重要贸易伙伴,2006—2007年期间对中国出口份额增加了22%^[6]。虽然蒙古矿产资源,如金大多数来源于冲积型砂金矿,但博洛金矿床不仅是蒙古国发现的首个且唯一的露天开采的岩金矿床(表1),而且还是开采规模与产量最大的金矿。与此同时,在矿床南东发现另一处大型金矿——盖特苏尔特矿床,2个矿床具相似的成矿条件与矿床成因。因此,对博洛矿床的调查研究不仅为邻区金矿提供了地质信息,更为在肯特金矿带及蒙古国内寻找同类型金矿提供了全面的地质资料,加之目前对该矿地质方面研究的文献较少,本研究对于了解及调查研究“一带一路”重要成员国——蒙古的矿产资源具有重要意义,也为“一带一路”政策实施与中国企业走出去提供了科学依据。

2 产出环境

2.1 大地构造背景

蒙古位于亚洲大陆的中央腹地,属于欧亚板块。蒙古北部和东部由众多古生代因造山作用而增生到西伯利亚克拉通东南边缘的地体组成^[7],其中博洛金矿(图2)位于蒙古北部由哈拉(Haraa)组组成的北肯特金矿带(North Khentei Gold Belt,图3)内,该带是蒙古国最重要的成矿带,处于北蒙褶皱系和蒙古-后贝加尔褶皱系的分界处,由2个二级大地构造单元组成,其中巴彦格勒断裂是区内一级、二级构造单元的分区断裂;北肯特造山带是新元古

界一下古生界的褶皱隆起带,带内低-中级变质的绿片岩相和绿帘石-闪石相地层发育,且此地层与构造条件对金成矿有利^[2,10]。其中,北肯特造山带以北东向断裂为主,部分断裂伸入俄罗斯境内几百千米,还有一些大断裂的累积左行位移达几十千米,多被视为增生地体的边界构造,在东北向大断裂区域内还充填有岩脉群。古生代北肯特地区构造演化可概括为:①早古生代挤压事件期间克拉通内的哈拉沉积盆地关闭,紧接着博洛复合花岗岩侵入(晚造山阶段),表明本地区在中古生代可能长期遭受隆升和侵蚀作用;②泥盆纪和石炭纪开始出现小的沉积盆地,直接证据是浅水碳酸盐岩与陆源沉积;③最后地体抬升,二叠系长英质深成-火山杂岩体侵入,然后再次被抬升剥蚀,仅余零星的凝灰岩或喷出相岩石^[4]。

地震方面的研究提出,位于西伯利亚下地幔内的中侏罗世板片,可以为晚二叠世—中生代中期活动的俯冲带及与其伴生的火山岛弧在蒙古-鄂霍次克洋盆完全闭合^[11]后才停止俯冲的观点提供证据^[1]。

2.2 地层

北肯特金矿带主要有4个岩石单元:①新元古界一下古生界哈拉组变质沉积岩与晚奥陶世博洛花岗岩侵入体(黑云母花岗闪长岩U-Pb测年:441.9±6.6Ma、452.2±3.9Ma)^[4];②早二叠世宗莫德长英质深成岩-火山岩与沉积岩(全岩K-Ar年龄295±20Ma;黑云母Rb-Sr年龄305±30Ma;全岩K-Ar年龄288.4±1.4Ma);③晚三叠世—早侏罗世哈扎尔(Khazaar)花岗杂岩^[1];④晚中生代含煤沉积岩与含砂金矿的古近纪—新近纪沉积岩^[1]。

表1 蒙古典型金矿(据参考文献[1-2]修改)
Table 1 The list of typical gold deposits in Mongolia

序号	矿床名称	矿床外文名称	主要矿种	成因类型	品位与储量
1	博洛	Boroo	金	造山型脉状金矿床	平均品位3.52g/t 金储量约66t
2	查干陶勒盖	Tsagaan tolgoi	金	热液型/石英脉型金矿	Au最高品位37g/t 预计储量1.5t
3	苏开特	Sukhait	金	热液蚀变型/脉型	平均品位2.3g/t 最高品位20g/t
4	库尔曼努尔	Khulman Nuur	金	热液蚀变/石英脉型	
5	巴尔拉高尔	Barlag Gol	金	冲积型砂金矿	
6	额仁	Ereen	金、银	岩金	Au品位1.0~11.6g/t 金储量6.91t
7	依克通克罗尔	Ikh Tokhoirol	金	砂金	金储量3.77t
8	赫木尔	Humul	金	砂金	Au平均品位0.47g/m ³ 储量41.3t
9	达布金卡尔	Davkhyn khar	金	浅成热液型	Au品位2.03~22.13g/t 平均2.09g/t,资源量46t
10	昆克尔	Khunkher	金	浅成热液角砾岩型	

博洛地区出露地层主要为寒武系—奥陶系哈拉(Haraa)组一套单一的复理石沉积序列,该深海浊流沉积岩序列由页岩、粉砂岩和细砂岩组成,岩石发生强烈褶皱并遭受低绿片岩相区域变质作用,在花岗岩侵入接触边缘局部地段叠加了接触变质(钠长石—绿帘石—角岩相)作用,侵入岩与沉积岩呈侵入接触关系,区域内可见侵入岩中含有沉积岩捕虏体。

2.3 构造

博洛金矿位于哈拉(Haraa)组内,该地层位于由巴彦湖(Bayangol)与彦格湖(Yeroogol)断裂为边界构成的断层系统内,区域内主断裂延伸约100km,左行累积位移约10km^[1,8]。在北肯特金矿带内,北西向断层与彦格湖断层交切,交切处利于金矿化。其中博洛矿床位于近水平的博洛断裂带中,该断裂带是彦格湖断裂的次级分支^[9],同时也是上覆变质岩(哈拉系列)与下伏岩体博洛花岗岩的分界线。矿区断层呈北西向倾斜,为大型逆冲断层且与区内主走滑断裂有关,区域内发育一系列北西向高角度断裂,在北东向的主断层之间夹发育较好的北西向断裂,该断裂带具明显的张性特征。区域内北西向、北向及北东向断裂被大量岩脉充填^[12]。

博洛矿区岩石主要为哈拉变质岩与博洛花岗岩,大量长英质细晶岩与中性闪长岩呈明显的晚期

岩墙状或透镜状,多呈近直立、近北向或北西走向的岩脉穿切上述岩石及其中的构造,因此岩脉穿切的博洛断层应早于岩脉期的火成活动,博洛断层本身形成了一个独特的地质单元,由花岗岩、变沉积岩的混合岩带和局部闪长岩块体组成^[2,10]。

2.4 岩浆岩

北肯特金矿带内主要的花岗岩为早古生代(450~520Ma)的产物^[1]。博洛杂岩体由浅色花岗岩和闪长岩脉组成,覆盖于哈拉和博洛花岗岩之上的粗砾碎屑沉积岩系(磨拉石)时代为石炭纪—二叠纪。矿床内岩浆岩主要分布在矿区中南部和北部地区,其花岗岩主要位于断层下盘,是赋矿围岩。博洛杂岩体为浅灰色—浅肉红色,主要岩石类型有斜长花岗岩、黑云母花岗岩、钾长花岗岩、花岗闪长岩等,以块状构造为主,结构主要为花岗结构、碎裂结构,主要组成矿物有斜长石、钾长石、石英、黑云母,副矿物有锆石、金红石,其中斜长石多为自形—半自形板状,钾长石多呈他形粗晶,具卡式双晶且发育显微条纹构造,石英为他形粒状,黑云母常呈叶片状弯曲。矿物以中粒为主,部分颗粒达5~8mm。岩石破碎明显,斜长石绢云母化与高岭土化普遍发育^[9]。此外,博洛花岗岩以等粒状、粉红色长石斑晶为特征,花岗岩和角闪岩岩脉分布

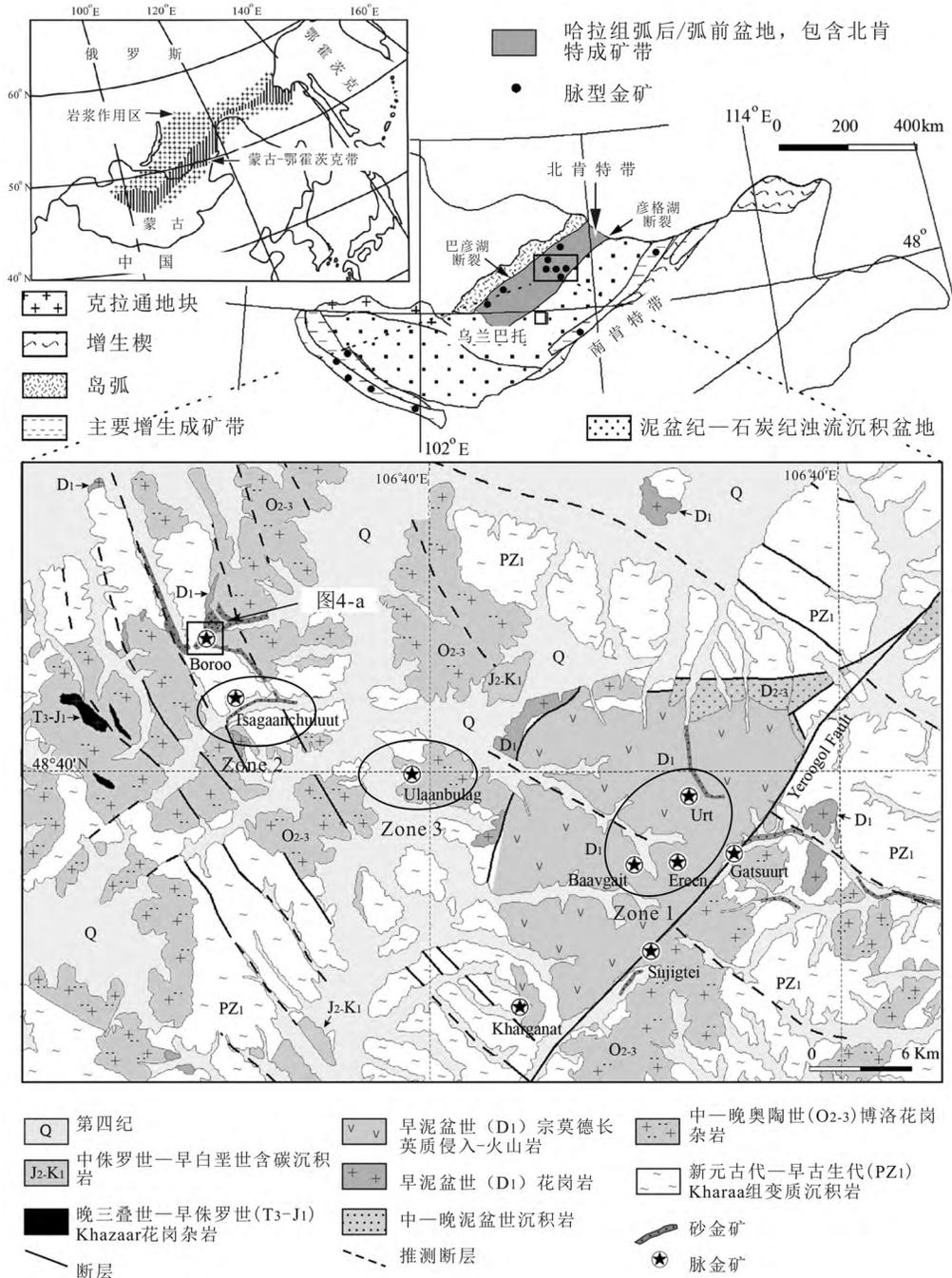


图 2 博洛金矿地理位置

(据参考文献[8]修改, Zone1、Zone2、Zone3 为圈定靶区, 详见 5.2 节)

Fig. 2 Geographical location of the Boroo gold deposit

于整个矿区, 厚度由几厘米至几米不等, 沿北北西向垂直断裂带分布, 形成近垂直和缓倾角的岩墙网脉群^[1-2]。岩体有大量英安岩、流纹岩和细晶岩脉侵入花岗岩和变质沉积岩中, 花岗岩边部局部叠加有钠长石-绿帘石-角闪岩相的接触变质带。

3 矿床特征

3.1 矿体分布形态

金矿体主要为石英脉、细小的石英脉及蚀变岩, 呈透镜状、层状、脉状, 大多沿近水平, 少量沿近垂

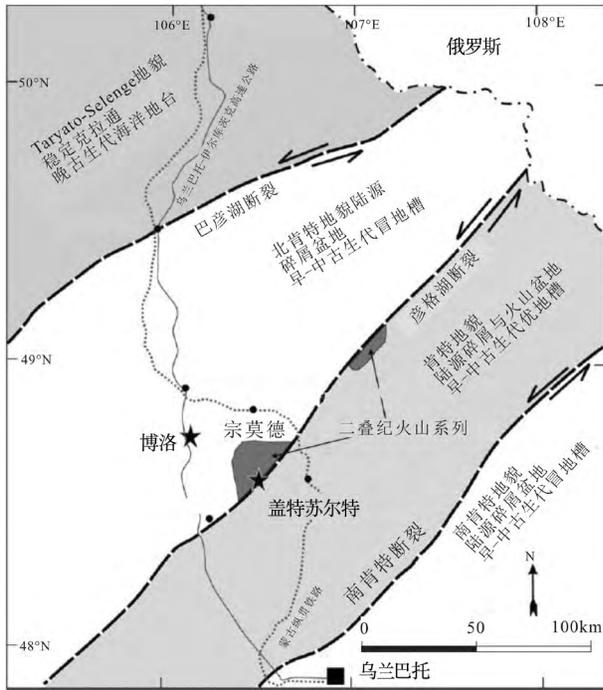


图3 博洛金矿与蒙古中北部主要构造单元^[1,9]

Fig. 3 Major tectonic elements of north-central Mongolia showing the location of the Boroo gold deposit

直排列的张性裂隙产出。该矿床共有4个采区(图4-a),但目前2号、5号采区的矿石已开采完毕,3号采区是开采的核心区域,6号矿区于2008年开始开采。通过钻孔数据,CGI将矿床各点品位与矿体厚度相乘得到品位×厚度轮廓图(图4-b),整个矿化带(金异常 $\geq 100 \times 10^{-9}$)长度超过2500m,宽度至少400m,局部厚度达100m,单个矿体甚至可达1km长。矿化蚀变晕(金含量 $\geq 1\text{g/t}$)的厚度受围岩渗透率影响,5、6号采场均一变质沉积岩的渗透率为5~10m;3号采场花岗岩、闪长岩和变质沉积岩的渗透率为20~30m。由于蚀变区叠加及矿体较厚部分的矿化作用,矿体厚度变化较金品位的变化更大,故品位×厚度变化(图4-b)很好地表现出矿体整体为北西—南东向延伸,以及矿体透镜状样式出现的厚薄变化规律^①。

浸染状矿化的金一般为细粒、低—中品位(1~5g/t),而石英脉型矿化的金一般为粗粒,出现不规则的高品位(10g/t),最高为100g/t。金含量 $> 100 \times 10^{-9}$ 的含金蚀变带或异常晕圈的总体长度超过2500m,宽度最少400m,局部厚度达100m。蚀变晕中的矿石级(平均品位大于1g/t)矿化带的厚度与

围岩的渗透性呈函数关系,矿化带厚度在矿区5~6号采坑的均质变沉积岩中为5~10m,在非均质的3号坑花岗岩、闪长岩和变沉积岩中为20~30m,单个矿体长度可达1km。因此博洛金矿被认为是一个单独的、巨大的、产于古生代变沉积岩和花岗岩中的金矿床^①。

3.2 岩石学、矿物学组合特征及围岩蚀变

博洛矿区出露寒武纪—奥陶纪高度变形的哈拉(Haraa)组浊积岩序列中的页岩、砂岩及粉砂岩与古生代花岗质博洛杂岩。大量英安岩、流纹岩和细晶岩墙侵入到矿区内花岗岩与变质沉积岩中。博洛地区沉积岩强烈褶皱(图版I-c),并遭受低级区域变质作用(绿片岩相)叠加到小范围钠长石—绿帘石角岩相的接触变质带,而该接触变质带位于花岗岩侵入体的边缘。区域内花岗岩类主要有斜长花岗岩、黑云母花岗岩、黑云母—闪长花岗岩、淡色花岗岩。这些花岗岩在博洛矿床的中部及北部地区大量出现,尤其是矿床的2、3号采场。此类花岗岩在当地被认定为博洛杂岩体,以具等粒结构和可见粉红色长石斑晶为特点。

博洛矿区内分布的花岗斑岩与闪长岩组分的岩脉(图版I-d,e),厚度由几厘米变化至几米不等,这些岩石常沿着北北西向垂直断层区域分布,形成了网状近垂直且缓倾斜的狭窄矿体^[1]。

矿区矿石中金属矿物主要有黄铁矿、毒砂,次为黄铜矿、黝铜矿、方铅矿、褐铁矿等,脉石矿物主要有石英、绢云母、钠长石、绿泥石、方解石、铁白云石等;矿床主要容矿围岩为花岗岩、闪长岩和变质沉积岩。主要蚀变类型有硅化、绢云母化、青磐岩化、碳酸盐化,局部可见钠长石化等,蚀变分带明显,以石英—绢云母—黄铁矿蚀变为中心,蚀变强度向外降低,逐渐变为一个更大范围的青磐岩化的蚀变晕圈。在浸染状和网脉状矿石中,通过 $2\text{H}^+ + 2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (钠长石)+ KAlSi_3O_8 (微斜长石) $\rightarrow \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (绢云母)+ 2Na^+ + 6SiO_2 (石英)反应,产生蚀变矿物绢云母、石英,故通常情况下,金矿化与强烈的石英绢云母化蚀变相伴随^[2,10]。

3.3 矿化

博洛矿床主要的矿化类型有2种:金—硫化物型矿化、金—石英脉型矿化^①。

(1)金—硫化物型矿化是博洛金矿最主要的矿

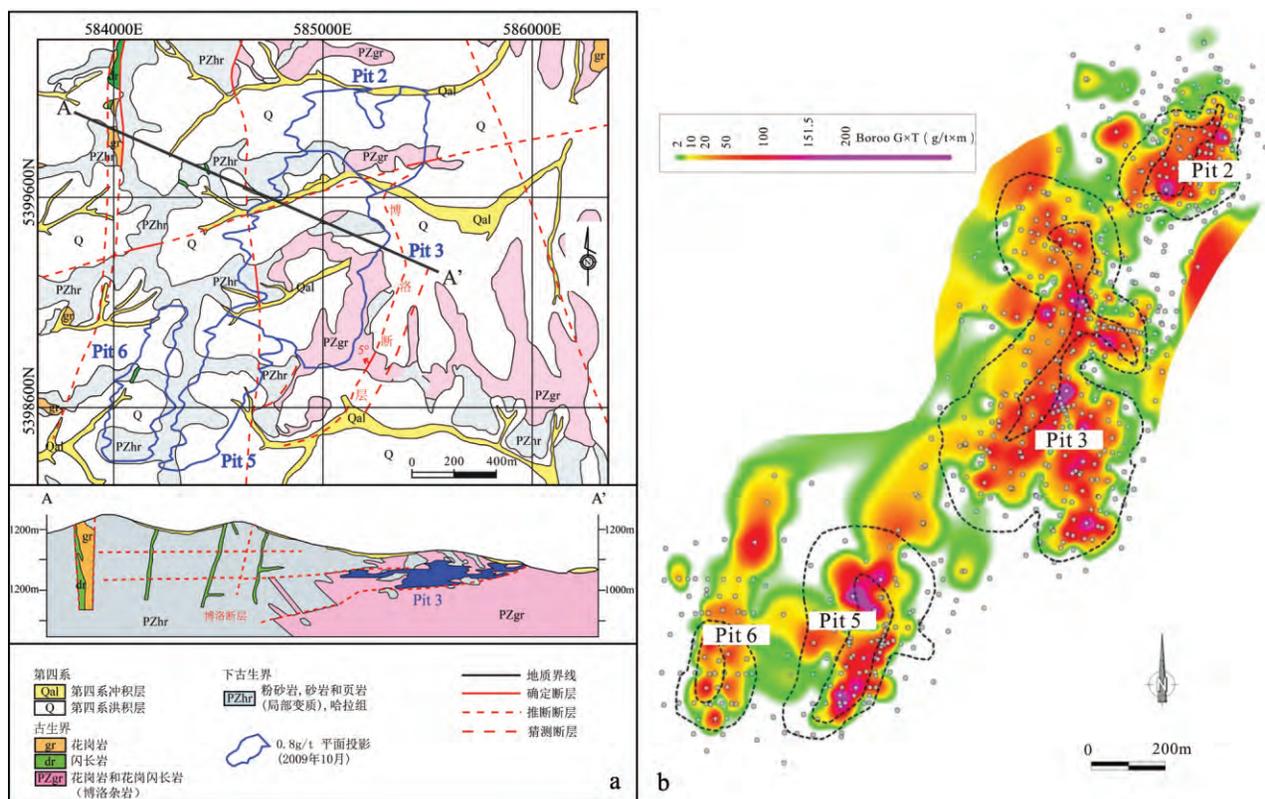


图 4 蒙古国博洛金矿区地质简图(a)和博洛矿床金矿品位(G)×厚度(T)轮廓图^①(b)

Fig. 4 Geological map of the Boroo deposit with reserve pit footprints and interpretive section through Pit3(a) and grade thickness, showing dominant northeast and northwest structural framework of the ore district (b)

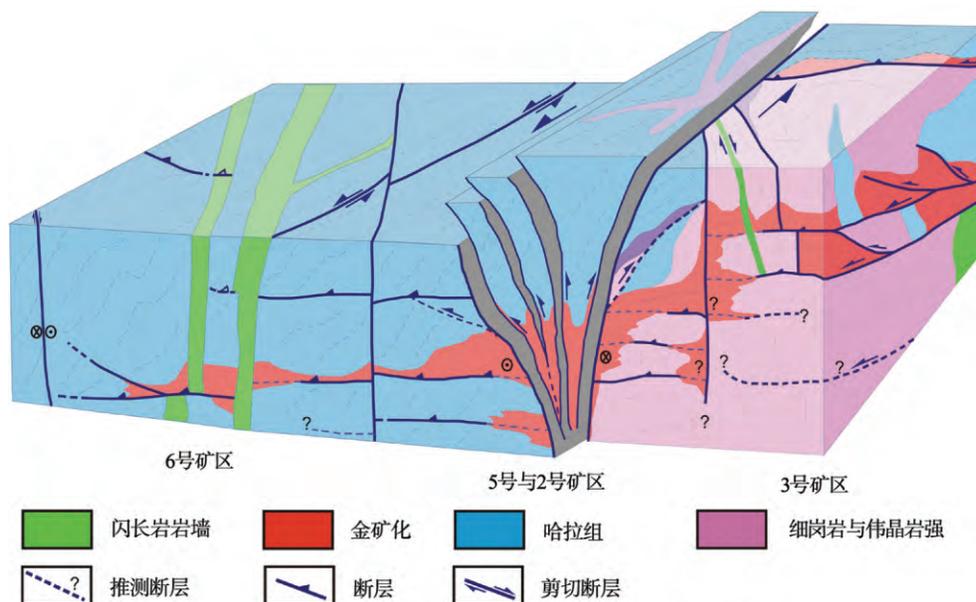


图 5 博洛金矿成矿模式^②

Fig. 5 Metallogenic model of the Boroo deposit

化类型,其产出形式为金-黄铁矿-毒砂-石英脉矿化,其中石英-绢云母蚀变带内矿化广泛发育,尤其在薄的不规则细脉或网脉内常见。花岗岩中含浸染状黄铁矿与毒砂,且石英-钠长石-绿泥石(绿帘石)蚀变矿物发育。硫化物的矿化强度取决于主围岩和蚀变强度。其中主要的硫化物矿物是黄铁矿、毒砂及少量黄铜矿、黝铜矿和方铅矿。金在此类矿化作用中颗粒相对较细,等粒花岗岩(图版 I -f; Au 品位 1.83g/t)中典型的蚀变组合为钾-绢云母-石英细脉,并具典型的近正交网脉与柱状形态的硫化断层泥,这是博洛金矿的 2 个常见特征;蚀变花岗岩硅钾质脉(含 Au 平均品位为 19.39g/t;图版 I -g)中常出现原生金颗粒与毒砂。

(2)金-石英脉型矿化中,金常以粗粒赋存于大量的石英脉中,脉体厚度最薄几厘米,最厚达 3m,常以脉体或细脉出现于变质沉积岩中。脉体含少量硫化物和大量肉眼可见的金颗粒,此类矿化在规模上属于次要的,但其含金量却可高达数百克每吨。

以上 2 种矿化类型中,金矿化由浸染型细粒金-黄铁矿-毒砂矿化组成,伴随有强烈的石英-绢云母-铁碳酸盐蚀变,局部叠加有含金石英脉。浸染型矿化通常携带细粒金(微米级),Au 的品位由低到中等(1~5g/t)且矿化均匀;当石英脉携带粗粒的金时,Au 品位可达 10~100g/t^[1]。值得注意的是,富

金石英脉及硅质矿化带均被浸染状及网脉状的金矿化区域包围或包含,显示出金矿化形成来自热液流体^[10]。与此同时,最新研究发现,博洛矿石中金矿化主要呈现 4 个阶段的矿物组合特征:①黄铁矿-I+毒砂-I;②黄铁矿-II+毒砂-II;③闪锌矿+方铅矿+黄铜矿+黝铜矿+车轮矿+硫锑铅矿+硫砷钴矿+自然金;④自然金。在含金石英脉矿石中,通过以下矿物集合体可识别出 5 个矿化阶段,分别为:①黄铁矿-I;②黄铁矿-II+毒砂;③闪锌矿+方铅矿+黄铜矿;④富银黝铜矿+车轮矿+自然金;⑤银金矿。其矿物的共生序列见图 6^[9]。

3.4 地球物理

博洛金矿与许多使用苏联勘探体系的蒙古矿床不同,该矿直到 1998 年才进行首次地表磁法勘测,此后大量地表磁法与激发极化法在该矿床周边运用。同多数以硫化物为主的成矿体系一样,博洛金矿以高激化率为特征。如图版 I -h 所示,博洛矿床显示中强激化率,与金矿化一致,激化率异常变化受硫化物含量、硫化物颗粒大小和(成矿)物质深度变化的影响。与矿床有关的局部的低磁性是后期石英-绢云母蚀变事件的结果。这一蚀变事件通常叠加于原黄铁矿-毒砂的矿化基础上,使矿化作用更富集,并将原磁性矿物转为非磁性状态^[10],故激电异常对于识别地区金矿化有重要意义。在博洛

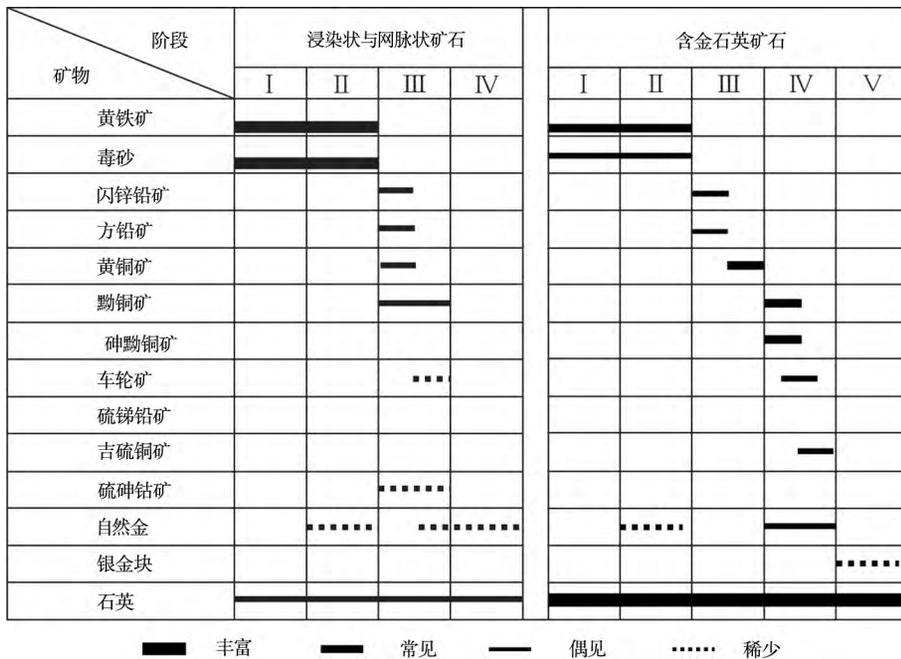


图 6 博洛矿床矿石矿物的共生序列^[9]

Fig. 6 Paragenetic sequence of ore minerals in the Boroo deposit

以西的 Sumber Soum 地区,阿勒坦约有限公司(Altan Rio Ltd)运用此方法发现高激化率异常(极化率 $>17\%$)后,成功钻孔勘查到金矿化并确定开展 Khavchuu 计划^[13]。

区域上,地球物理数据对界定赋存于该矿床的地质构造背景十分有效。博洛区域上呈南北向和北东向的断裂主要可由低磁性数据有效绘制,侵入于南北向构造内的闪长岩墙群具有连续、细小、高强度的磁性响应。由与岩墙有关的磁响应受干扰可推断,所绘制的岩墙群与矿床东北向构造后期所经历事件相吻合,但依据收集的数据,对博洛断裂的识别效果不明显,甚至无法识别^[1],故地磁法对于识别该地区地质情况作用不佳。

4 矿床成因

4.1 地球化学特征

关于博洛矿床地球化学的研究,主要记载于早期机密勘察报告与当时控股矿业公司的内部报告中,可收集的已发表资料仅有早期少量文献^[14-15]。由于其化学分析结果无法验证,故不讨论未发表的地球化学数据。已有资料表明,博洛矿床具有 Au、As、Sb 异常富集的地球化学特征^①。

Cluer 等^[1]将采自博洛金矿露天采矿场内部及其附近的岩心样品(1163 块)作为测试对象,以代表矿区多种蚀变岩石。测试发现,Al、Fe、K、Mg、Mn 等主量元素与 Co、Cu 等微量元素的含量具有双峰式分布的特点(图 7),反映出围岩化学成分的差异。该组元素相关性强,与 Mg、Co、Fe、Ni、Cu、Zn、Mn、P、Al、Ca、Sr 和 K 元素联合形成主要因子 1。

Au 和 Ag($R_2=0.63$)相关性强,但 Ag 含量在矿化岩石中较低,变化范围为 $0.1 \times 10^{-6} \sim 4.5 \times 10^{-6}$,故 Au/Ag 值为 0.7~400+,在 $Au > 100 \times 10^{-9}$ 的样品中,该比值平均达 15。最高 Ag 异常值为 15.5×10^{-6} ,出现于含金石英脉或变质沉积岩的网状脉中,但 Ag 的高值罕见;Au 和 As($R_2=0.72$)以具有最强相关性为特征,反映 As 在博洛金矿成矿系统中的重要性。As 的最高值可达到 1%,但矿石中含量通常超过 1000×10^{-6} ,As 沿着博洛断裂形成一个连续且宽阔的成分晕圈,且含金带均被 As 晕圈包裹;Au 和 Sb($R_2=0.56$)相关性强,但 Sb 通常以低值为特征,最高值变化范围为 $10 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$,此波动范围出现于矿床南部(5 号和 6 号矿区),且黝铜矿在含金岩石中

常见;Au 和 Pb($R_2=0.33$)不具强相关性,但是方铅矿在 3 号、5 号和 6 号矿区中的含金石英脉中常见;Au 和 S($R_2=0.56$)相关性强,这是由于金矿化与硫化物(黄铁矿+毒砂)相关所致;Au 和 Sr($R_2=0.23$)具有低但重要的相关性,因为 Sr 与因子 1 中其他主量元素相关联,且沿钻孔向下的地球化学数据显示,含量为 $200 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$ 的 Sr 晕圈与含金区带伴生。虽然矿区没有含 Sr 矿物出现,但其可能含在钾化等蚀变矿物内。故博洛金矿地球化学特征相对简单,以包含 Au、As、S、Sb、Ag 为特征,该组元素与 Sr、Pb 联合可得因子 2^[1]。

通过对博洛矿区出露的博洛杂岩中黑云母花岗岩的主量、微量元素地球化学研究表明,黑云母花岗岩表现为高硅、富钾、富碱、弱过铝质、钙碱性,稀土元素分布具有明显的负 Eu 异常;微量元素蛛网图表现出贫 Nb、Ta、Sr、P、Ti 和 U,富集 Rb、Th、Pb 的特点;该岩体的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.70986 \sim 0.70891$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i=0.512138 \sim 0.512115$,平均值为 0.512127, Nd(t) 变化范围为 1.2~1.4,平均值为 1.3,故表明岩浆为壳源但受幔源物质混染。综合地球化学参数判断其产于造山后环境,且与金矿成因关系不密切^[4],故认定区域内岩浆岩仅为金成矿提供容矿空间。

4.2 流体包裹体

由于博洛矿区包裹体资料难以查到,本文数据均来自与博洛金矿成因、产出位置及其成矿环境相近的盖特苏尔特金矿,以此提供参考。在盖特苏尔特金矿内发现的浸染状与网脉状矿石中,其流体包裹体呈群簇产出于石英中,室温下对包裹体的组成相进行光学显微镜观察,可见流体包裹体共有 3 种类型,通过对包裹体测温确定了其均一温度^[9]。

第一类为三相流体包裹体(液相-液体 CO_2 - CO_2 气泡)与两相包裹体(液相-液体 CO_2),这些包裹体被定义为 I 型包裹体, I 型共生组合是所有类型流体包裹体中最丰富的。I 型包裹体又被细分为 2 个亚类: I a 型,特点是液相 CO_2 体积大于液相水(目估体积大于 50%); I b 型则含有体积 50% 以上的液相水。多数 I 型流体包裹体作为独立的包裹体群出现,呈现出三维空间上的排布,且被认为是原生包裹体。该类包裹体的大小为 $10 \sim 30 \mu\text{m}$,具圆形、不规则、矩形等形状。

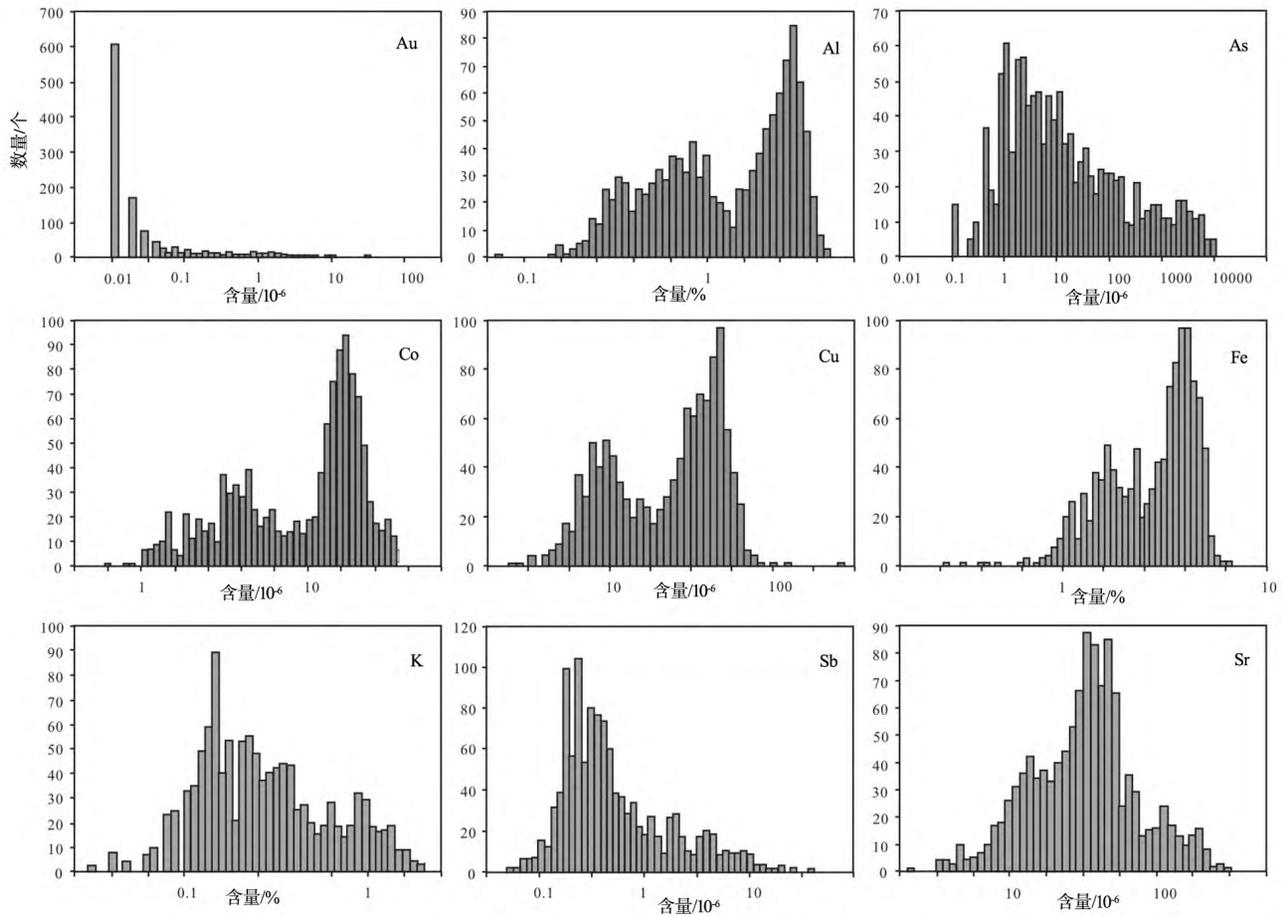


图7 主量元素Al、Fe、K的双峰式分布与亲铁及微量元素Co、Cu的元素含量柱状图^[1]

Fig. 7 Histograms of selected elements (logs)

第二类为液相水和蒸汽水的两相共存包裹体,将其定义为Ⅱ型水流体包裹体。其中蒸汽相的体积小于包裹体体积的50%,形状为圆形与负晶形,大小在5~15 μm 之间。原生包裹体具有在寄主石英晶体生长方向上延长的独特形状,而微裂隙愈合时捕获的次生包裹体常出现于微裂隙面或穿切寄生矿物生长环带的曲面上。

第三类(Ⅲ型)包裹体由液相水、岩盐和液相 CO_2 组成,这类包裹体外形为不规则到圆形,大小25~30 μm ,被分为原生包裹体。

主矿区西南部浸染状和网脉状矿石样品中Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型流体包裹体的均一温度范围分别为194~327 $^{\circ}\text{C}$ 、194~282 $^{\circ}\text{C}$ 和208~240 $^{\circ}\text{C}$;而在中央矿区北东部浸染状与网脉状矿石样品仅有2类包裹体,其中Ⅰ型、Ⅱ型流体包裹体的均一温度范围分别为

289~355 $^{\circ}\text{C}$ 、254~292 $^{\circ}\text{C}$ (图8)^[9]。

4.3 同位素年代学

通过对与金矿化同期的蚀变矿物(绢云母、钾长石)进行Ar-Ar法测试,测得博洛金矿的成矿年龄为185~210Ma,但这些蚀变矿物的年龄的时间跨度较大(近30Ma),求得平均年龄为179.5 \pm 1.1Ma(图9),说明其矿化作用发生于早中侏罗世;该年龄跟毗邻的盖楚尔特金矿床(图3)测得的平均年龄178Ma(早侏罗世晚期)相近,应属于同期^[1,16]。该年龄与矿区岩浆侵入体(黑云母花岗岩)(SHRIMP 锆石U-Pb年龄441.9 \pm 6.6Ma、452.2 \pm 3.9Ma)相差较大,后者2组年龄分别被解释为花岗岩的结晶年龄及蚀变黑云母花岗岩的结晶年龄,表明博洛花岗杂岩体为早古生代晚期岩浆作用的产物,与金矿化无密切关系,仅为矿体提供容矿空间^[4]。

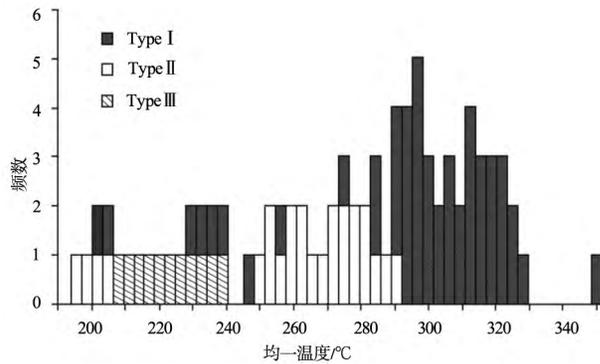


图8 石英原生流体包裹体均一温度柱状图
(样品为中央主矿区内浸染-网状矿石)^[9]

Fig. 8 Histogram of homogenization temperatures of the primary fluid inclusions in quartz of the disseminated and stockwork ores of the main and central zones

4.4 矿床成因模式

关于博洛金矿的矿床成因具有争论,最初观点认为是与侵入岩有关的脉型金矿床^[1],但其后蒙古国学者更倾向将其划分为蚀变单元(石英-绢云母-黄铁矿蚀变为核部,向外蚀变减弱,并且逐渐变成非常宽的青磐蚀变晕)中低硅 Au+As 硫化物系统(即低硫石英)中的金矿床;Sillitoe^[17]于1993年提出岩浆侵入对博洛金矿的形成作用,还有学者^[1]强调,该矿与还原型花岗岩岩浆侵入作用有关,但当时侵入体的侵入机制未能识别,故未能对该机制提供严谨的图件及地质年代学方面的证据,后来通过对博洛花岗杂岩进行测年,发现其成岩与成矿年龄差别较大,因此证明博洛花岗杂岩与金的成矿作用并无直接关系,仅为矿化提供成矿空间^[4]。

该矿为造山型金矿的观点由 Goldfrab 等^[16]提出,根据博洛的地层褶皱等地质特征,结合毗邻的盖楚尔特金矿的包裹体等测试结果均验证了该观点。对博洛矿床初步 Ar-Ar 测年发现,成矿作用发生在早中侏罗世,同时有大量相似矿床存在于东亚的增生楔中^[18-19]。

造山型金矿是构造控制的脉状后生热液矿床,在时间、空间和成因上与板块汇聚型造山作用密切相关^[20]。金山金矿作为中国典型的造山型金矿,位于中国赣东北新元古代深大断裂带中的德兴矿集区,是华南重要的有色金属及贵金属生产地,而与

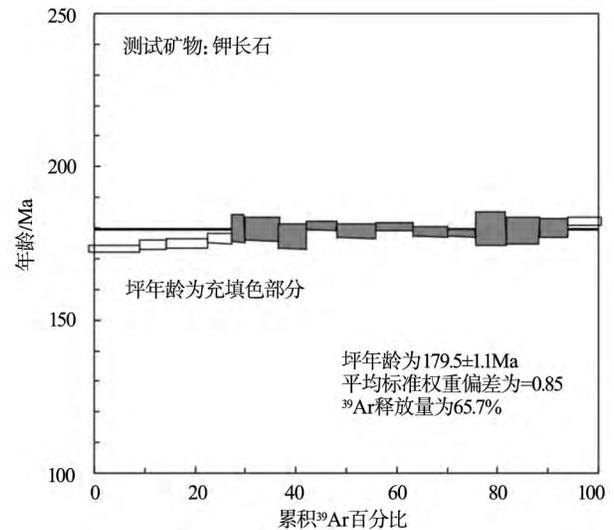


图9 Ar-Ar 坪年龄图^[11]

Fig. 9 The Plateau age data

德兴矿集区毗邻的金山金矿是国内典型的超大型造山型金矿^[21],该矿床与博洛金矿具有一些共同的特点(表2),如两者矿床规模都较大(大于50t)且周边均有同类型金矿床的出现,赋矿围岩均含有变质浊积岩、矿化类型均主要为浸染状与脉状、矿化与区内岩浆作用不密切、低角度断裂构造对矿体的控制等;但也存在不同点,如金山金矿矿石储量已达超大型金矿、矿化叠加作用明显、大地构造背景不同等。总体上,金山与博洛金矿可进行类比,而博洛金矿体水平延伸广、周围伴随有同类型金矿床等特征,可为蒙古国北肯特金矿带寻找同类型金矿提供借鉴。

5 找矿标志与找矿靶区

5.1 找矿标志

博洛金矿为造山型金矿,同时北肯特金矿带区域内发现有大量同时代与岛弧有关的含金侵入杂岩体,故中生代中期的造山型脉金矿在该区域具有较大的找矿潜力^[1,8]。结合博洛矿床的地质特征,找矿标志总结如下。

(1)构造标志:①寻找北蒙古褶皱系和蒙古-鄂霍次克构造带内巴彦格勒断裂的区内二级构造单元的分段断裂,此构造条件为金成矿有利宏观条件;②在NKGB内,北西向断层与断裂区与彦格湖断层交切,交切处亦被认为有利于金矿化。

表2 造山型金矿、蒙古国博洛金矿及江西金山金矿矿床特征对比
Table 2 Geological characteristic contrast between the orogenic-type gold deposit, the Boroo deposit and the Jinshan gold deposit

典型特征	造山型金矿	蒙古国博洛金矿	江西金山金矿
成矿跨度	从中太古代持续到古近纪, 主要发生在晚太古代、古元古代与显生宙	中生代(185~210Ma)	未达成统一认识,成矿时间由161Ma至780Ma均有提出
构造背景	变形的大陆边缘,主要是外来地体(碰撞造山带、俯冲增生楔、陆内造山带)	增生到西伯利亚克拉通东南边缘的地体	经历多期造山作用的复合体
控矿构造	严格受挤压和转换拉伸构造的晚期阶段控制	近水平的大型逆冲断层—博洛断裂带,与区内主走滑断裂有关	地处赣东北深大断裂的金山韧性推覆变形带中,以低角度的韧性剪切变形为主
赋矿围岩	类型多样,主要是铁镁质火山岩、侵入岩或杂砂岩、板岩及浊积岩系列	主要是花岗杂岩侵入体(由浅色花岗岩和闪长岩脉组成),部分为浊积岩	杂砂岩、板岩、变凝灰岩,偶见闪长岩与辉绿岩
赋矿围岩变质相	从次绿片岩相到低麻粒岩相,主要为绿片岩相	绿片岩相	糜棱岩相与碎裂岩相
岩浆岩	一般为长英质到煌斑岩或大陆边缘岩基	主要有斜长花岗岩、黑云母花岗岩、钾长花岗岩、花岗闪长岩等浅色花岗岩	矿区岩浆活动微弱,仅见辉石闪长岩和辉绿岩
矿化类型	矿化类型多样,有细脉浸染状石英脉、大脉、鞍状矿脉,及富铁岩石的交代型	主要为脉状和浸染状	类型多样,呈散浸染状、角砾状、脉状及网状均有出现
矿化构造特征	复杂多样,主要为脆-韧性区域	断层张性特征明显	复杂多样,主要为脆-韧性区域
矿床叠加程度	具有明显的多期次成矿事件叠加	~	叠加明显
金属元素组合	Au-Ag±As±B±Bi±Sb±Te±W	Au-Ag±As±Sb±S	Au-W±As±Sb±Bi
蚀变类型	绢云母化、碳酸盐化、硅化、硫化	硅化、绢云母化、青磐岩化、碳酸盐化	硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化等
蚀变分带	具有潜在的侧向和垂向分带	具有明显蚀变分带	构造分带、蚀变分带及金矿化强度分带三者界限基本一致,具规律性
近矿围岩蚀变	随着变质程度的变化而变化,主要为云母-碳酸盐-Fe硫化物	位于剪切带的中心部位,主要是石英-黄铁矿化带	位于剪切带的中心部位,按金0.1g/t圈定矿化带基本框定金矿体的赋存空间,主要是石英-黄铁矿-铁白云石化带
温压条件	50~450MPa, 220~600℃,一般为150±50MPa, 350±50℃	富Au矿区矿石流体包裹体均一温度194~355℃	金矿流体包裹体均一温度在142~360℃、主要集中于260~290℃;含金石英脉的流体压力16.7Mpa,而含金糜棱岩流体压力98MPa
成矿流体	低盐度H ₂ O-CO ₂ ±CH ₄ ±N ₂ (盐度3%~10%),高CO ₂ 含量(>5%)	~	可变,NaCl-H ₂ O流体包裹体盐度在1.2%~8.5%之间
热源	多源,软流圈的底辟作用,中地壳花岗岩类的侵入	~	区域大规模变质作用和构造-岩浆活动提供热量
成矿物质来源	俯冲地壳/上壳层岩石/深部花岗岩类	与岛弧有关的含金属侵入杂岩体	来源于壳源,与围岩关系密切,围岩双桥山群提供成矿物质
资料来源	[20-22]	①[1-2,10]	[21]

(2)地层标志:寻找北肯特主要出露复理石沉积序列的哈拉组,因该地层组内岩石发生强烈褶皱并遭受了低绿片岩相区域变质作用,这是金矿化有利的地层条件。

(3)围岩蚀变标志:博洛金矿可见分带明显的围岩蚀变,主要类型有硅化、绢云母化、青磐岩矿化、碳酸盐化及局部可见钠长石化等,蚀变以石英-绢云母-黄铁矿矿化为中心,由内向外以青磐岩化蚀变晕圈最大,可作为勘查找矿标志。

(4)地球物理及地球化学标志:①博洛金矿显示出中-强极化率,与金-硫化物矿化作用结果一致,故在区域上地球物理数据对于界定此类金矿化意义重大,且地球磁场数据对于识别博洛区域上的南北向、北东向断裂及南北向构造内的闪长岩墙群十分有效;②博洛地区As沿着断裂形成的元素晕将所有含金带包裹,可作为找矿潜力的重要标志。矿床的两组元素组合分别为因子1(Mg-Co-Fe-Ni-Cu-Zn-Mn-P-Al-Ca-Sr-K)和因子2(Au-As-S-Sb-Ag-Sr-Pb);③矿区矿石中Ⅱ期毒砂的结晶温度在365~300℃之间,热液石英脉中硫含量较网脉状及浸染状矿石低,博洛金矿与毗邻的盖楚尔特金矿的流体包裹体均一温度一致,且其矿区矿物及矿化特征适用于北肯特带同类型金矿的寻找,为进一步确定找矿靶区提供有效信息。

5.2 找矿靶区

在博洛矿区及盖楚尔特金矿所处的区域内找到多个脉型金矿矿点。该系列矿点所处地层及构造环境与博洛找矿标志中的构造地层标志一致,故将其确定为3个找矿远景区(图2),分别为:Zone1、Zone2、Zone3。Zone1内含金矿点3个(分别为Urt、Baavgait、Ereen),均处于中晚奥陶世博洛杂岩体内,位于彦格湖断裂的控制范围内;Zone2内含金矿点1个(Tsagaanchuluut),处于新元古代一早古生代Kharaa组变质沉积岩内,且同处于博洛控矿断裂带内;Zone3内含金矿点1个(Ulaanbulag),处于早泥盆世花岗岩体及博洛控矿断层与彦格湖断层交叉区域附近。

6 结论

(1)通过对比蒙古博洛金矿与中国江西金山金矿的成矿模型,发现在矿床规模、周边金矿床的产

出、赋矿围岩、矿化类型、矿化与岩浆岩关系、构造对矿体的控制等方面具有相似性,确定博洛金矿与金山金矿同属大型造山型金矿床。

(2)博洛矿床在电阻率法勘测中显示出高激电异常(极化率 $\geq 17\%$)与金-硫化物矿化一致的特点,对于寻找同类型金矿具有重要意义。

(3)博洛断裂带与毗邻的彦格湖断裂带附近及其内部共确定3处金矿远景区,分别为Zone1、Zone2、Zone3。这些远景区的确定为中国企业对外投资及博洛外围区域找矿具有指导意义。

致谢: 成文过程中得到中国地质科学院矿产资源研究所聂凤军研究员与中国地质大学(北京)客座教授Richard J Goldfrab的指导并提供资料,中国地质大学(北京)李子羲博士研究生、缪广硕士研究生提供帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]Cluer J K, Kotlyar B, Gantsetseg O, et al. Geology of the Boroo gold deposit, northern Mongolia[J].SEG-IAGOD Guidebook Series 11:Cercams/NHM Longon,2005:105-117.
- [2]李俊健.蒙古国地质矿产概况(第1版)[M].天津:天津科学技术出版社,2013.
- [3]韩九曦,连云长,元春华.蒙古国地质矿产与矿业开发(第1版)[M].北京:地质出版社,2013.
- [4]侯万荣,聂凤军,江思宏,等.蒙古国博洛大型金矿区花岗岩SHRIMP 锆石U-Pb 测年及地质意义[J].地球学报,2010,(3):331-342.
- [5]Centerra Gold Inc.Centerra inches toward Mongolian investment agreement[J].The Northern Miner., 2008,93(48):3.
- [6]聂凤军,江思宏,白大明,等.蒙古矿产勘查与开发现状评述[J].地质论评,2010,56(1):105-113.
- [7]莫中国,韩美莲,李锦轶,等.蒙古-鄂霍茨克造山带的组成及造山过程[J].山东科技大学学报(自然科学版),2005,3:50-52.
- [8]Chinbat K, Masahide A. Mineralogy of the Boroo Gold Deposit in the North Khentei Gold Belt, Central Northern Mongolia[J].Resource Geology,2015,65(4):311-327.
- [9]Chinbat K, Masahide A, Hiroto O, et al.Gold Mineralization of the Gatsuurt Deposit in the North Khentei Gold Belt, Central Northern Mongolia[J].Resource Geology,2014,64(1):1-16.
- [10]李俊健,刘新秒.蒙古地质矿产研究进展[M].天津:天津科学技术出版社,2013.
- [11]王鸿祯,何国琦,张世红,等.中国与蒙古之地质[J].地质前缘,2006,(6):1-13.
- [12]Badarch G, Cunningham W D, Windley B F.A new terrane subdivision for Mongolia:implications for the Phanerozoic crustal

- growth of Central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 21(1): 87–110.
- [13] Altanrio.com. Project: khavchuu, section 3[EB/OL] (2011) [2015–09–20] [www.altanrio.com/projects/khavchuu/\(2011\)](http://www.altanrio.com/projects/khavchuu/(2011)).
- [14] Dejidmaa G. Geochemical features of Boroo gold field in Mongolia[D]. Academy of Sciences(Novosibirsk): United Institute of Geology and Geophysics(U.S.S.R)(in Russian, PhD Thesis), 1985.
- [15] Dejidmaa G. Review of porphyry copper–molybdenum Erdenetiin–Ovoo deposit in Mongolia: Research on exploration and development of mineral resources in Mongolia[J]. *Geological Survey of Japan Bulletin*, 1995: 69–102.
- [16] Goldfarb R J, Taylor R D, Collins G S, et al. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 48–102.
- [17] Sillitoe R H. Intrusion–related gold deposits[C]// Foster R P. *Gold metallogeny and exploration*. Chapman & Hall, London, 1993: 165–209.
- [18] Fan H R, Zhai M G, Xie Y H, et al. Ore–forming fluids associated with granite–hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2003, 38(6): 739–750.
- [19] Qiu Y M, Groves D I, McNaughton N J, et al. Nature, age, and tectonic setting of granitoid–hosted orogenic gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37(3/4): 283–305.
- [20] 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. *中国地质*, 2006, 6: 1181–1196.
- [21] 李晓峰, 华仁民, 韦星林, 等. 江西德兴金山金矿[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 1–165.
- [22] Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S, et al. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis [J]. *Ore Geology Reviews*, 2001, 18(1/2): 1–75.
- ① Tommaso R R, Daniel R. Technical report on the Boroo gold mine Mongolia. Centerra Gold Inc., 2009.
- ② Ochir G. Mineral Deposits in Mongolia (PPT report). Geoscience Center Mongolian University of Science & Technology, 2015.
- ③ James W H, William E R, David A R, et al. Technical report on the Gatsuert golod project, northern Mongolia. Roscoe Postle Associates Inc., 2006.