

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.04.009

内蒙古哈达门沟金矿田矿床地质特征及成岩成矿模式

潘振宁,付斌,翟利俊,李伟,薛建平*

(内蒙古包头鑫达黄金矿业有限责任公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要:哈达门沟金矿田矿(化)体有5种表现形式:钾长石脉型矿(化)体、石英脉型矿(化)体、复脉型矿(化)体、石英-钾长石脉型矿(化)体及蚀变岩型矿(化)体。矿石类型有4类:第一类,钾长石脉型矿石;第二类,石英脉型矿石;第三类,石英-钾长石脉型矿石;第四类,蚀变岩型矿石。矿田内矿床矿化类型主要有黄铁矿化、黄铜矿化及方铅矿化;矿田内围岩蚀变有钾长石化、硅化、绿泥石化、绿帘石化、绢云母化及碳酸盐化等。蚀变相严格分为内、外蚀变带。内蚀变带为硅化和钾化;外蚀变带为绿泥石化和绿帘石化以及绢云母化;而碳酸盐化贯穿于整个矿(化)体。矿(化)体5种表现形式,矿石的4类型及围岩蚀变的分带性互为因果,相互解释,互相对应。钾长石脉型矿(化)体、石英脉型矿(化)体有规律的两壁含Au量高于中部的含Au量;各类矿(化)体含Au量不同性及各类矿(化)体中石英-钾长石脉型矿(化)体含Au量最高性;单一矿(化)体中矿石类型具多样性、复杂性;围岩蚀变分为内蚀变带和外蚀变带的蚀变分带性,这些均说明了以钾长石脉、石英脉二次成脉岩和含Au熔体流体流一次侵入成矿为主要内容的岩浆通道系统成矿理论的正确性。通过岩浆通道系统成矿理论,矿田成岩成矿模式为:片麻岩成岩之后,发生区域变质作用,形成构造薄弱带,在构造拉张应力作用下,钾长石岩浆侵入形成钾长石脉,随后硅质岩浆侵入形成石英脉,至此,岩浆通道系统形成。经过矿化作用的钾长石脉所占的空间、石英脉所占的空间、含Au熔体流体流所占的空间、包括发生了矿化蚀变片麻岩Au空间,既是岩浆通道成矿系统,同时也是容矿的空间。理论指导生产实践,认识清楚了矿床特征及成岩成矿模式,对于地表找矿与深部找矿,以及提振矿山找矿及生产意义重大。

关键词:哈达门沟金矿田;矿床地质特征;成岩成矿模式;岩浆通道系统成矿;高温高压含Au熔体流体流

中图分类号:P618.51

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2021)04-0113-16

Geological Features of Ore Deposit and Diagenetic and Metallogenic Model of the Hadamengou Gold Ore Field in Inner Mongolia

PAN Zhenning, FU Bin, ZHAI Lijun, LI Wei, XUE Jianping*

(Xinda Gold Mining Limited Company, Baotou, Inner Mongolia, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: Gold-mineralized bodies of the Hadamengou Gold Ore Field in Inner Mongolia have five main forms: they are potassic feldspar vein type, quartz vein type, two veins type, quartz-potas-

收稿日期:2020-03-24;修回日期:2021-04-22

基金项目:内蒙古自治区包头市“哈达门金矿接替资源勘查”项目(12120113081000)。

作者简介:潘振宁(1973-),男,高级工程师,从事矿产勘查、区域地质矿产调查及矿床地质研究工作。E-mail:923834838@qq.com。

* 通讯作者:薛建平(1974-),男,博士,从事矿产勘查、区域地质矿产调查及矿床地质研究工作。E-mail:1438319972@qq.com。

sisic feldspar vein type and altered gneiss type. There are four types of ore in this area: potassic feldspar vein type ore, quartz vein type ore, quartz-potassic feldspar veins type ore and altered rock type ore. The wall rock alteration and mineralization include pyritization, brass mineralization, galena mineralization, potassic, silicification, chloritization, epidotization, sericitization and carbonation, etc. Alteration phase are divided into inside and out alteration. Inside alteration zone consists of potassic and silicification and out alteration zone consists of chloritization, epidotization and sericitization. Carbonation exists through out gold mineralized bodies. The five main forms of gold-mineralized bodies, the four types of ore and the zoning of the wall rock alteration, mutual interpretate and correspond to each other. The gold content are higher in the regular two walls of Potassic feldspar vein type gold-mineralized bodies and in the quartz vein type gold-mineralized bodies than in those of the middle part. Mineralized-bodies have different gold content; quartz-potassic feldspar vein type gold-mineralized bodies have the highest gold content. Ore types in single gold mineralized body have the characteristics of diversity and complexity. The zoning property of the wall rock alteration can be divided into inside alteration zone and out alteration zone. These all prove the correctness of the theory of magmatic conduit metallogenic system, in which ore forms in the process of the intrusion of the potassic feldspar vein, the quartz vein and the gold-bearing fluid flow. Based on the magmatic conduit metallogenic theory, the authors infer a diagenetic and metallogenic model of gold ore field. Regional metamorphism occurred after the gneiss diagenesis, forming structural weak zone; under the tectonic tensile stress, potassic feldspar veins formed with the potassic magma intrusion, and later quartz veins formed with siliceous magma intrusion; thus magmatic conduit system formed. The space occupied by mineralized potassic feldspar vein, mineralized quartz vein, gold-bearing fluid flow, including the space occupied by mineralized and altered gneiss, is both the magmatic conduit metallogenic system and ore-holding space. The geological features of ore deposit and the diagenetic and metallogenic model of the Hadamengou gold ore field have great significance for the surface and deep prospecting and the confidence of mine prospecting and production.

Keywords: Hadamengou gold ore field; geological features of ore deposit; diagenetic and metallogenic model; magmatic conduit metallogenic system; HTHP melt-fluid flow bearing gold

成矿理论源自矿山生产实践的观察与总结,反过来又服务于生产实践。野外观察到的第一手资料是成矿理论与矿床科学问题的基础资料,可信度高。详细系统地观察地表与深部矿(化)体、矿石以及矿化蚀变,识别新的成矿环境与近矿环境,总结与验证成矿规律,更新成矿理论,是地质找矿人就矿找矿、矿产调查的有效途径。近年来,“岩浆通道成矿系统”在寻找岩浆岩型矿床中取得了比较好的找矿效果(苏尚国等,2010,2014;张波,2012;Naldrett et al.,1995;Naldrett,1999,2004;Evans - Lamswood et al.,2000;Li et al.,2001;Lightfoot et al.,2012)。该成矿理论强调,成矿的重中之重的环节是源自地球深部的流体/气体参与成矿作用,这些气体

加入岩浆房,使岩浆房具有超压环境,由于流体超压,这些气体携带比重大的矿质在地壳浅部就位。含矿熔体-流体在岩浆通道就位过程中,由于温度、压力及氧逸度等环境的变化,其矿物共生组合会发生系统变化。

哈达门沟金矿田地质矿产研究水平达到了相当的高度,地质工作者进行了多方位、多角度的地质与矿产研究,形成了许多有价值的成矿理论(李伟等,2003;辛向东等,2010;陈代鑫,2015;刘纲等,2010;刘得文,2014;张翰瑶,2017)。关于矿床成矿物质-含 Au 熔体流体流来源有不同的看法,互不统一。成矿热液主要源自大桦背岩体说(聂凤军等,1994),岩浆热液与变质地层经硫混合作用的产物(郎殿有

等,1998),来源于岩浆水和部分变质热液,后期有天然水的混入(侯万荣,2014),成矿物质源自伟晶岩(中国人民武装警察部队黄金指挥部,1995)。关于矿床成因类型存在很大分歧,主要有如下类型:第一类,岩浆热液型(薛建平等,2010,2013;侯万荣,2014;章永梅,2012);第二类,变质(混合岩化)型(Gan et al.,1994);第三类,伟晶岩型(中国人民武装警察部队黄金指挥部,1995);第四类,绿岩带型(聂凤军等,1994;郑翻身,2005;翟裕生等,2002);第五类,铁氧化物型(李强之等,2003)等。

笔者通过大量系统详细地野外观察,经过项目团队人员室内综合讨论分析研究,结合众多科研人员的研究成果,利用“岩浆通道成矿系统”理论,以期对哈达门沟金矿田独特的矿(化)体、矿石类型、围岩蚀变和成岩成矿模式进行解释,试图整合众说不一的哈达门沟金矿田成矿理论,为该类型金矿在矿田内地表及深部找矿提供理论依据。

1 区域地质背景

哈达门沟金矿田由乌拉山金矿区、柳坝沟金矿区及哈达门沟金矿区组成,三者矿(化)体类型一致,矿石组成相同,围岩蚀变种类一样(图1)。哈达门沟金矿田位于华北板块北缘,距离古亚洲洋闭合-华北板块北缘与西伯利亚板块碰撞的最终位置——索伦山地区300 km左右,而古亚洲洋经历了张开、发育、俯冲消减、大洋闭合及大陆板块碰撞造山完整的板块构造旋回。在古生代与中生代期间,受古亚洲洋板块持续不断地俯冲消减于华北板块北缘斜下方的影响,之后又受华北板块与西伯利亚板块二者碰撞的影响,最后在大陆板块碰撞结束伸展背景的影响下,华北板块北缘发生了强烈的构造运动和变形变质作用,并且发生了多期次岩浆活动,形成了一系列岩浆岩(薛建平等,2017a,2017b,2018a,2018b;张晓飞,2018;赵子贤,2018)和内生金属矿床(薛建平等,2017c,2017d,2017e;陈雪薇,2018;沈华等,2019)。特别是在乌拉山一线,受其长期影响,地质作用复杂,主要有构造-变形变质作用、岩浆作用以及成矿作用,形成了哈达门沟金矿田,构成了乌拉山金成矿带的重要组成部分。

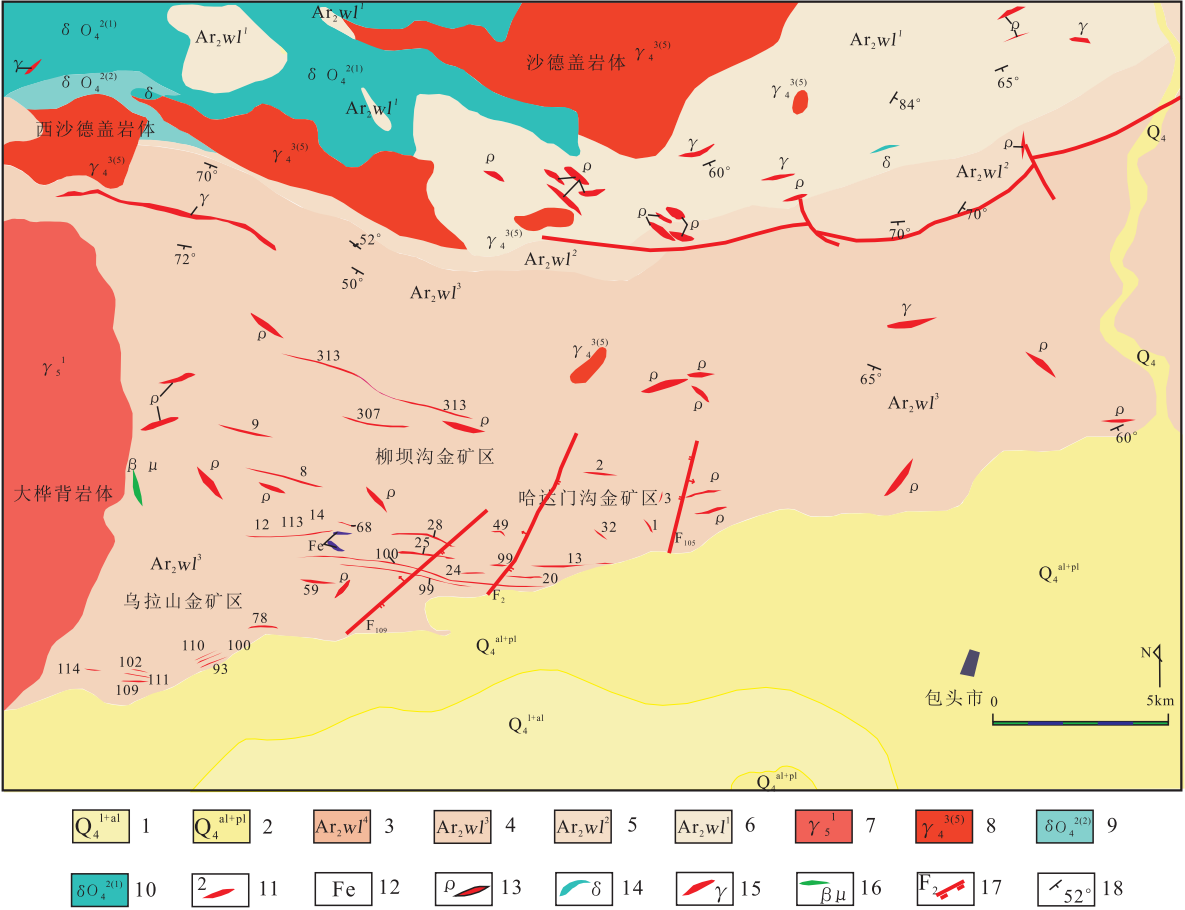
2 矿区地质

哈达门沟金矿田出露的地层单元主要为太古界乌拉山群,普遍发生片麻理化现象,通常片麻理走向近东西向,南倾,岩性主要为变质岩。乌拉山群变质岩中Au的丰度平均值为 12.7×10^{-9} ,丰度值为 $4.5 \times 10^{-9} \sim 24.0 \times 10^{-9}$,类比显生宙地层,丰度值明显较高(中国人民武装警察部队黄金指挥部,1995;郑翻身等,2005)。乌拉山群片麻岩是主要的赋矿围岩,在片麻岩与矿(化)体的接触部位,片麻岩发生了矿化与蚀变作用,有的蚀变片麻岩达到了工业品位。

矿田内与成矿关系最为密切的构造是构造薄弱带,即脉岩所占据的空间。该薄弱带形成之初为裂隙、节理密集区,在区域拉张引力之下开裂,岩浆侵入,形成岩浆通道,最终在该通道内就位,形成钾长石脉,或者石英脉,或者中-基性脉岩。在两次成岩的通道内,钾长石脉与石英脉接触面上,含Au熔体流体更容易发生快速上升,发生矿化与蚀变,最后成矿。

脉岩是一类非常重要的构造产物和岩浆产物,近年来引起了众多地质科研工作者的关注。脉岩充填于岩浆通道之中,可以表明岩浆的物质成分(Scarrows et al.,1988;Westerman et al.,2003)和脉岩形成过程(Poland et al.,2004);脉岩充填在构造薄弱带中,其空间分布方式可以精准反映脉岩形成时构造应力场(Ancochea et al.,2003);脉岩所在的构造薄弱带也是含矿熔体流体流借以上升的良好通道,最终在成矿阶段赋存成矿,而脉岩也成为了显著的找矿标志(Ressel et al.,2000)。所以,脉岩会在整个造山旋回中各个时期均有生成,可以恢复区域大地构造演化;当区域构造应力场由挤压转换为伸展背景时,构造薄弱带为岩浆的快速侵位与含Au熔体流体流的上升与成矿创造了良好条件(罗照华,2006)。

哈达门沟金矿田韧性剪切带即为构造薄弱带的一种表现与形态,与矿化带平行排列,被认为与成矿关系密切。其形成于区域变质作用高温高压接近于熔融而未熔融的状态下,受剪切力之后冷却固结成岩,接近于类似片麻理的形成时间,或者晚于片麻理的形成。脉岩位于韧性剪切带之内,韧性剪切带这种构造薄弱带先形成,其后脉岩侵入。所以绝大部分脉岩位于韧性剪切带之内。



1. 湖积、冲积砂砾层;2. 冲积、洪积砂砾层;3. 夹大理岩变粒岩组;辉石变粒岩;4. 斜长片麻岩组;混合岩、黑云母角闪斜长片麻岩;5. 大理岩组;含石棉蛇纹石化大理岩;6. 片麻岩夹大理岩组;条带状混合岩、角闪辉石二长片麻岩;7. 肉红色中细粒黑云二长花岗岩;8. 肉红、褐色中细黑云母花岗岩;9. 粉灰色中花岗闪长岩、石英闪长岩;10. 灰绿色细粒石英闪长岩;11. 金矿脉;12. 铁矿脉;13. 伟晶岩脉(钾长石脉);14. 闪长岩脉;15. 细粒花岗岩脉;16. 辉绿岩脉、辉绿玢岩脉;17. 实测及推测性质不明断层;18. 地层产状

图 1 哈达门沟金矿田区域地质图

Fig. 1 Regional geological map of the Hadamengou gold ore field in Inner Mongolia

包头-呼和浩特山前断裂与临河-集宁断裂带被认为是 在矿田内与成矿关系极其密切的近东西向深大断裂构造带,矿田褶皱构造发育。

矿田西侧出露大桦背花岗岩岩体,北侧出露沙德盖中酸性岩体及西沙德盖中酸性岩体,而矿田范围内则主要为脉岩。

3 矿(化)体

矿田内已发现金矿(化)体 100 多条,共划分为 7 个脉群:乌兰不浪沟的 113 号脉群,哈达门沟的 13 号脉群、24 号脉群、49 号脉群、1 号脉群、59 号脉群,

柳坝沟的 313 号脉群。矿(化)体多呈脉状、似板状,以近东西向走向为主(哈达门沟 13 号脉、22 号脉、24 号脉、25 号脉、28 号脉等,乌兰不浪沟的 113 号脉、59 号脉和柳坝沟 313 号脉、314 号脉、307 号脉、302 号脉等),少数呈北西走向分布(哈达门沟 32 号脉、1 号脉)。地表矿化体出露长度短则几十米,长则 6 000 余米(313 号脉),宽度为 0.1~10 m,勘探、开采延伸为 1 000~2 000 m(313 号脉、3 号脉、113 号脉)。各个矿(化)体间距长短不一,少则几米,多则上百米,也有相交汇合之处。

矿(化)体有 5 种表现形式(图 2):第一种为地表常见复脉型矿(化)体,中间为石英脉,两侧为钾长



a. 复脉型; b. 石英脉型; c. 钾长石脉型; d. 石英-钾长石脉型; e. 蚀变片麻岩型

图 2 矿(化)体 5 种类型图

Fig. 2 Five types gold mineralized bodies

石脉,最外侧为片麻岩或者辉绿岩脉等中-基性脉岩;第二种为石英脉型矿(化)体,中间为石英脉,外侧为片麻岩或者以辉绿岩脉为代表的中-基性脉岩;第三种为钾长石脉型矿(化)体,外侧为片麻岩或者辉绿岩脉或者其他中-基性脉岩;第四种为深部标准矿(化)体,石英-钾长石脉型矿(化)体,可见残留原生石英脉与钾长石脉,最外侧为片麻岩或者辉绿岩脉或者其他组分的中-基性脉岩;第五种为构造型矿(化)体(少见),是蚀变片麻岩型矿(化)体,无石英脉,无钾长石脉,只存在一个构造薄弱带,有金属矿化就成为矿(化)体,局部可见片麻岩的片麻理构造。

按照矿床工业指标(边界品位: 0.8×10^{-6} ,最小可采厚度:1.0 m; $m\cdot g/t$ 值: $\geq 1.8 m\cdot g/t$),圈定出的矿体,单一矿体(13 号脉)5 种矿体类型尖灭再现,断续出露,石英脉、钾长石脉呈透镜状,厚度方面

薄厚相互转换,有时会出现多个分枝;5 种矿体类型或者深部与浅部有变化,或者矿体在走向上不同。单个矿体,矿体类型互相过渡,相互衔接,构成独具特色的哈达门沟金矿田。

通过矿(化)体 5 种类型的相互转换可以看出,哈达门沟金矿田地表和深部标准矿(化)体结构,地表标准矿(化)体结构由内侧向外侧依次为石英脉、钾长石脉、片麻岩;深部标准矿(化)体结构为石英-钾长石脉。矿(化)体中的 Au 品位达到一定的工业品位时便形成了工业矿体。

矿(化)体的走向各个方向都有,90%矿(化)体走向近东西。矿(化)体品位高低不一,均有出现,有石英脉处一般品位较高,但是厚度较大而完整的石英脉品位也不高,厚实石英脉两壁品位高于中部位(图 2)。

4 矿石

哈达门沟金矿田的矿石表现出不一样的颜色、矿物组合、结构、构造及矿物组成。主要有 4 种矿石类型(图 3):石英脉型矿石、钾长石脉型矿石、石英-钾长石脉型矿石及蚀变岩型矿石。常见矿石结构主要包括结晶结构和交代结构,见少量固溶体分离结

构和压力结构,主要构造为脉状、网脉状、细脉状构造、角砾状及浸染状、斑点状构造等,矿石结构构造具有热液(含 Au 熔体流体流)成因的性质。

石英脉型矿石:矿石矿物包括自然金与含 Au 硫化物,含 Au 硫化物包括黄铁矿,黄铜矿,方铅矿等,含 Au 组分还包括含 Au 挥发分(表现为烟灰色石英脉中的“烟灰色”与金属矿物集合体边缘的黑色、灰黑色组分)(图 3a)。



a. 石英脉型矿石; b. 钾长石脉型矿石; c. 石英钾长石脉型矿石; d. 及蚀变岩型矿石

图 3 4 种矿石类型图

Fig. 3 Four types gold ore

自然金:表现为各种粒度的不规则他形颗粒状结构。黄铁矿呈团块状、星散状、细脉状、稀疏浸染状分布。黄铁矿为矿田内数量最多、分布最广泛、与

金矿化关系最密切的金属矿物。浅黄色-淡黄白色,根据其结构,分为 2 种:一种为中粒自形-半自形晶结构;另一种为细粒他形结构;黄铜矿,铜黄色,不规

则他形结构或半自形粒状结构,矿田范围内含量较低,但是分布较为广泛,部分黄铜矿是载金矿物,为含 Au 黄铜矿;石英为该矿田内数量最多的矿物,分布最为广泛,与金矿化关系最为密切的脉石矿物之一,他形不等粒结构,根据野外特征分为 3 种类型:第一类为细粒致密乳白色石英,石英脉内部伴生有自形程度较高、颗粒较大的黄铁矿,主要位于石英脉的中部,含 Au 量少或者几乎不含 Au,为原生石英脉,而石英脉两壁含 Au;第二类,烟灰色石英脉,其内部伴生细粒黄铁矿,并且自形程度低,含 Au 量中等,裂隙发育;第三类,石英呈浸染状,细脉状、网脉状及蠕虫状,可见大量细粒他形黄铁矿、细粒他形黄铜矿、细粒他形方铅矿等金属硫化物,呈现流动构造样式(图 3a),金属硫化物位于中间,而烟灰色灰黑色挥发性组分位于两侧。

钾长石脉型矿石或者称其为钾长石化蚀变岩型矿石:其主要成分是钾长石,矿石中黄铁矿呈现微-细粒浸染状分布。钾长石为矿田内数量最多,分布最广泛,与金矿化关系最密切的脉石矿物之一,野外多肉红色,浅红褐色。

石英-钾长石脉型矿石:为该矿田内一种独具特色的、典型的矿石类型,外观表现可见石英脉胶结原生钾长石角砾、原生石英角砾,内部发育细粒他形含 Au 硫化物。例如,黄铁矿、黄铜矿、方铅矿等,石英呈密集细小脉状穿插于其中。

蚀变岩型矿石:多分布在石英脉、或者钾长石脉、或者石英-钾长石脉的两侧,为矿(化)体的最外侧部分,无明显且稳定的钾长石脉或者石英脉或者石英-钾长石脉穿插,矿石中可见残存的暗色矿物,还可见暗色矿物定向排列显示的残存片麻理,这些均显示为片麻岩被蚀变矿化的特征。充分表明含 Au 熔体流体流蚀变了片麻岩,而后发生矿化,形成矿(化)体,黄铁矿多呈细粒浸染状分布。

4 种矿石类型含 Au 量不同,据统计比较,通常情况下,Au 品位最高的矿石类型是石英-钾长石脉型矿石(平均为 $3.5 \times 10^{-6} \pm$),其次为石英脉型矿石(平均为 $3.0 \times 10^{-6} \pm$),其后为钾长石脉型矿石(平均为 $2.5 \times 10^{-6} \pm$),最后为蚀变片麻岩型矿石和蚀变辉绿岩脉型矿石(平均为 $1.5 \times 10^{-6} \pm$)。

5 围岩蚀变与矿化

岩石在外界温度压力条件改变时,或者有流体

参与时,使其矿物发生物理反应或者化学反应,包括颜色、颗粒大小、形状、成分等的变化,在岩石学上称之为变质作用,而在矿床学中称之为围岩蚀变作用。由上述地质作用形成的岩石,前者称作变质岩,后者称作蚀变岩。哈达门沟金矿田主要矿化与蚀变分别为镜铁矿化、黄铁矿化、赤铁矿化、黄铜矿化、方铅矿化,钾长石化、硅化、碳酸盐化、绿泥石化、绢云母化和绿帘石化等。蚀变相表现为内、外蚀变带。内蚀变带为硅化,钾化;外蚀变带为绿泥石化、绿帘石化、绢云母化;而碳酸盐化贯穿于整个矿化体。钾长石化主要源自钾长石脉中的钾长石发生了蚀变;硅化绝大部分源自石英脉中石英结构构造颜色的改变;绿泥石化、绿帘石化、绢云母化是哈达门沟金矿田典型的外带蚀变,位于蚀变带的最外侧,相当发育,主要源自片麻岩中黑云母、角闪石等发生的蚀变作用。

钾长石化简称为钾化。哈达门沟金矿田内既有与金矿无关的钾化,也有与金矿有直接关系的钾化。钾化是矿田内一种重要的标志性蚀变,随处可见红色钾化与红色钾长石脉,这也是判断成岩成矿模式复杂之处,独具特色之处。多期钾化互相交叉切割穿插,呈肉红色、浅灰红色、深红色。

硅化是矿田内最为常见的蚀变,与成矿关系密切。石英表现为细脉状、均匀分布弥散状、网脉状或者浸染状构造,石英脉中间裂隙发育的部位,以及石英脉两壁常发育团块集合体状黄铁矿和黄铜矿及方铅矿等金属矿物。而石英细脉、网脉中发育浸染状细粒他形黄铁矿、黄铜矿及方铅矿等金属矿物。硅化表现出不同的外观,石英脉常穿插先成地质体,或者石英脉内部胶结钾长石角砾、石英脉角砾。

黄铁矿化在哈达门沟金矿田各个类型矿(化)体中有均广泛发育,是赋存 Au 的重要组成部分之一。哈达门沟金矿田黄铁矿分为 2 期:早期黄铁矿颜色较浅,自形程度较高,为近硅质黄铁矿;后期黄铁矿为含 Au 矿物组分,大部分黄铁矿无法充分结晶而呈细粒他形结构。由矿石中金属矿物集合体可知,黄铁矿、黄铜矿、方铅矿等金属矿物均为含 Au 矿物的主要组成成分,且总体上具有流动性构造,两侧具有黑色含 Au 挥发性组分,如烟灰色石英脉。

绿泥石化、绿帘石化、绢云母化位于矿(化)体蚀变带的最外侧,为哈达门沟金矿田独具特色的外带蚀变。绿泥石化、绿帘石化源自片麻岩中的黑云母、角闪石等暗色矿物与含 Au 熔体流体流发生化学反

应而成;绢云母化主要是片麻岩的斜长石发生化学反应蚀变而成。

碳酸盐化为哈达门沟金矿田一种非常重要的蚀变,分布广泛程度可与钾化、硅化类似,碳酸盐化形成的矿物主要是方解石。其分布于各个类型的矿(化)体,也就是石英脉矿石、钾长石脉矿石、石英钾长石脉矿石、钾硅化蚀变片麻岩矿石中均有碳酸盐化分布,呈现细脉状或者弥漫状。

各种类型蚀变相当有规律,呈现内外蚀变分带的现象。在矿(化)体内侧以石英脉为核部,可见硅化、黄铁矿化、黄铜矿化及方铅矿化。外侧相邻由钾长石发生蚀变的钾化带,同样可见黄铁矿化、黄铜矿化及方铅矿化,硅化带与钾化带二者共同构成内蚀变带;在最外侧,石英脉、钾长石脉与片麻岩接触带,由于片麻岩发生了矿化蚀变,形成绢云母化、绿泥石化、绿帘石化。同时可见黄铁矿化、黄铜矿化及方铅矿化,构成外侧蚀变带;而碳酸盐化位于内外蚀变带及矿(化)体中。内外 2 个蚀变带不仅在矿物共生组合、岩石的结构上存在差异较大,而且内外蚀变带在空间上都以石英脉为核部,内蚀变带从不越过外蚀变带而与未蚀变的片麻岩直接接触,而外蚀变带有的成分被带入混进了内蚀变带。

6 哈达门沟金矿田成岩成矿模式

矿体出露地表部位可见钾长石脉晶体颗粒粗大,无矿化显示,不含 Au。另外,钾长石脉矿体中部无金矿化蚀变,而两侧可见金矿化蚀变;石英脉矿体中厚大无裂隙石英脉相对于两壁的中间部位,乳白色,油脂光泽,也无矿化显示,不含 Au。矿(化)体有规律的特殊现象——钾长石脉上部露头及中部,石

英脉中间不含 Au,所表现出的有规律的矿(化)体含 Au 不均一性充分说明钾长石脉形成之初的钾长石中不含 Au,石英脉成岩之初的早期石英中不含 Au。通常来说,钾长石脉、石英脉经过含 Au 物质侵入充填才能成为哈达门沟金矿真正的矿(化)体。矿(化)体中形成石英脉的硅质岩浆不含 Au,形成钾长石脉的钾长石岩浆也不含 Au,那么,钾长石脉与石英脉中的 Au 必然源自第三种物质——含 Au 熔体流体流的侵入。通过矿(化)体、矿石及围岩蚀变与矿化的观察与总结,证明了含 Au 熔体流体流的成分主要为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿及自然金等金属矿物(图 3a)、二氧化碳、镁离子、钙离子(图 2c 白色碳酸盐岩)及含 Au 挥发分(图 4)等。另外,根据地球化学中地球各层圈元素的丰度值,Au 等重金属元素主要来源于地球深部地幔以及地核,所以高温、高压含 Au 熔体流体流源自地球深部。然而,含 Au 熔体流的上升需要通道及一定的条件。

古生代期间,位于华北板块北缘的哈达门沟地区受古亚洲洋板块俯冲消减于其下的影响,在构造薄弱带形成大量节理、裂隙、劈理,而后开裂,钾长石质岩浆在阶段性拉张引力下快速上升形成钾长石脉;经过一定的地质时期,哈达门沟地区由于古亚洲洋板块的下插俯冲,构造应力由挤压转变为阶段性拉张力以后,在钾长石脉侵入的薄弱带,同样侵入石英脉,石英脉中可见钾长石脉捕虏体,钾长石脉上由于石英脉的侵入形成的暗化边、灼烧边;最后,在古亚洲洋闭合,华北板块与西伯利亚板块碰撞接合之后,区域性构造应力转化为较古亚洲洋俯冲时阶段性拉张力更为强大的区域性拉张力情况下,俯冲消减于哈达门沟地区壳幔深处的古亚洲洋板块发生向上折返,形成强大的向上挤压力,触发了壳幔边缘附

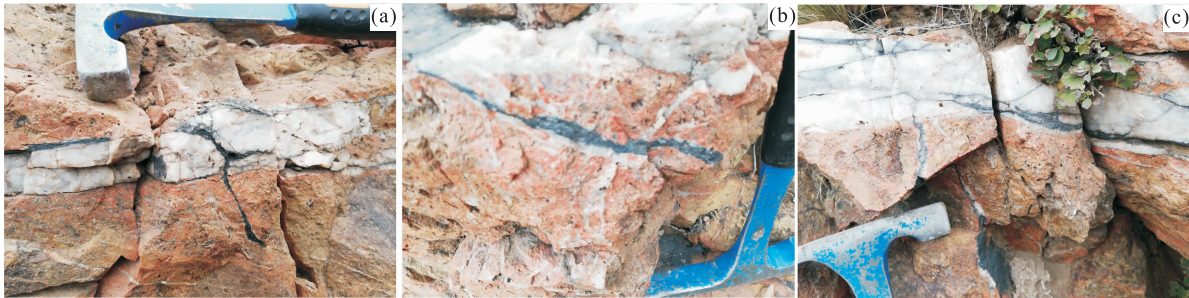


图 4 含 Au 熔体流体流(黑色部分)切穿石英脉、钾长石脉图

Fig. 4 Melt-fluid flow bearing gold(black part) intruded into quartz vein and potassic feldspar vein

近高密度、高温高压含 Au 熔体流体流形成与上侵。简言之,古亚洲洋俯冲消减时期的哈达门沟地区在阶段性地区性拉张力的情况下,脉岩形成;古亚洲洋俯冲消减结束以后的哈达门沟地区金矿形成。

高温、高压、高密度含 Au 熔体流体流形成成为成矿准备了物质条件,而强大的区域构造拉张力为成矿准备了上升动力条件;两次成脉岩的岩浆通道为成矿物质准备了上升通道与储矿场所。由于条件均已具备,高温、高压、高密度含 Au 熔体流体流在脉岩岩浆通道中快速上升,并且在石英脉与部分钾长石脉两壁及构造发育处发生矿化与蚀变,包括硅化与钾化;而脉岩中部未受到含 Au 熔体流体流作用的部分保持原生石英脉不变、原生钾长石脉不变;同时在含 Au 熔体流体流上升过程中形成了钾长石脉角砾、石英脉角砾捕掳体。当石英脉、钾长石脉同时存在,并且在高温、高压、高密度含 Au 熔体流体流作用强大处形成石英-钾长石脉。石英脉、钾长石脉、石英-钾长石脉由于受到高温、高压、高密度含 Au 熔体流体流在上升过程中的矿化蚀变作用强弱不同,造成了各类矿化体含 Au 量的不同,以及单个矿化体两壁与中部的含 Au 不均一性。

发生二次成岩作用、一次成矿作用的岩浆通道规模有限,并与矿(化)体规模基本一致,长度几十米到数千米,厚度几厘米到几十米,延伸到地球深部,同时也是脉岩的长度、厚度及延伸。构成岩浆通道的两壁既无走向上的位移,又无倾向上的滑移,再加上规模的限制,所以先期的构造薄弱带或者后期的岩浆通道不是断层,成矿熔体流体流并非沿着成矿期断层上升;矿(化)体破碎是成矿期后构造作用所为。由矿化体的形成过程可知,岩浆通道的构成主要有:原生石英脉、原生钾长石脉、原生石英角砾、原生钾长石角砾、矿化蚀变石英脉、矿化蚀变钾长石脉、石英-钾长石脉。含 Au 熔体流体流发生成矿作用以后,一部分以细粒他形浸染状结构构造就位于上述岩石中,一部分就位于上述岩石的接触面和裂隙中,还有一部分与最外侧片麻岩发生作用形成片麻岩矿化蚀变带。所以岩浆通道成矿系统包括了岩浆通道内的地质体组成部分和最外侧的片麻岩蚀变矿化带。

哈达门沟金矿田脉岩数量达上千条,种类有钾长石脉、石英脉及以辉绿岩为代表的中-基性岩脉,有的被含 Au 熔体流体流的侵入成矿,有的却不成

矿。未成矿主要是因为含 Au 熔体流体流上侵的时候脉岩构造不够发育,岩浆通道系统不足以让含 Au 熔体流体流上升通过;而那些成矿的脉岩中,经过 2 次成岩作用,在岩浆通道内形成的复脉接触面更多,导致构造更加薄弱一些,为随后含 Au 熔体流体流的侵入提供了更加优越的条件,含 Au 熔体流体流择优上升而成矿。根据含 Au 熔体流体流侵入最薄弱构造带的择优侵入原则,有的钾长石脉、石英脉岩浆通道内侵入了含 Au 熔体流体流而成矿,而有的钾长石脉、石英脉岩浆通道内含 Au 熔体流体流不能上升通过,因此不成矿。脉岩能否成矿取决于形成之时脉岩两侧及其内部构造是否发育,岩浆通道系统是否足够通畅,是否能够让含 Au 熔体流体流侵入上升。

通过以上分析,哈达门沟金矿田岩浆通道系统成岩成矿模式如下(图 5)。

在古亚洲洋整个演化过程中,哈达门沟金矿田一直处于稳定的大陆边缘和陆表海环境。寒武纪—奥陶纪在矿田沉积了浅海相砂泥质-碳酸盐岩地层。早泥盆世—早石炭世,古亚洲洋板块俯冲作用所诱发的岩浆活动形成大面积的花岗岩类侵入岩,区内大桦背岩体即形成于这一时期。由于古亚洲洋的俯冲消减,矿田在间断性拉张环境下形成了不同期次的钾长石脉、石英脉等与该区成矿相关的脉岩,为金矿床的形成准备了构造条件,因为脉岩本身就是构造的产物。最初在片麻岩形成之时,形成构造薄弱带;随后近南北向脉岩侵入(包括辉绿岩脉、钾长石脉);其次,近东西向脉岩侵入(包括辉绿岩脉、钾长石脉),因为近东西向脉岩总是切割、穿插近南北向脉岩(包括成矿脉岩与不成矿脉岩);最后在部分钾长石脉形成的岩浆通道内石英脉择优侵入。

滨西太平洋构造陆缘陆内造山阶段。中—晚三叠世,古亚洲洋闭合,华北板块与西伯利亚板块碰撞造山结束后,矿田处于拉张伸展背景之下,由于钾长石脉、石英脉、辉绿岩脉形成的岩浆通道系统内发育了众多裂隙、接触面、构造薄弱带,使源自壳幔边缘的高温、高压含 Au 熔体流体流(热液)更容易上升。在构造伸展拉张力的作用下,高密度、高温、高压含 Au 熔体流体流沿着已有的岩浆通道迅速择优上升侵入。含 Au 熔体流体流上升过程中与石英脉、钾长石脉、辉绿岩脉及片麻岩等岩石发生矿化蚀变作用,在岩浆通道内的裂隙面、脉岩接触面、构造薄弱

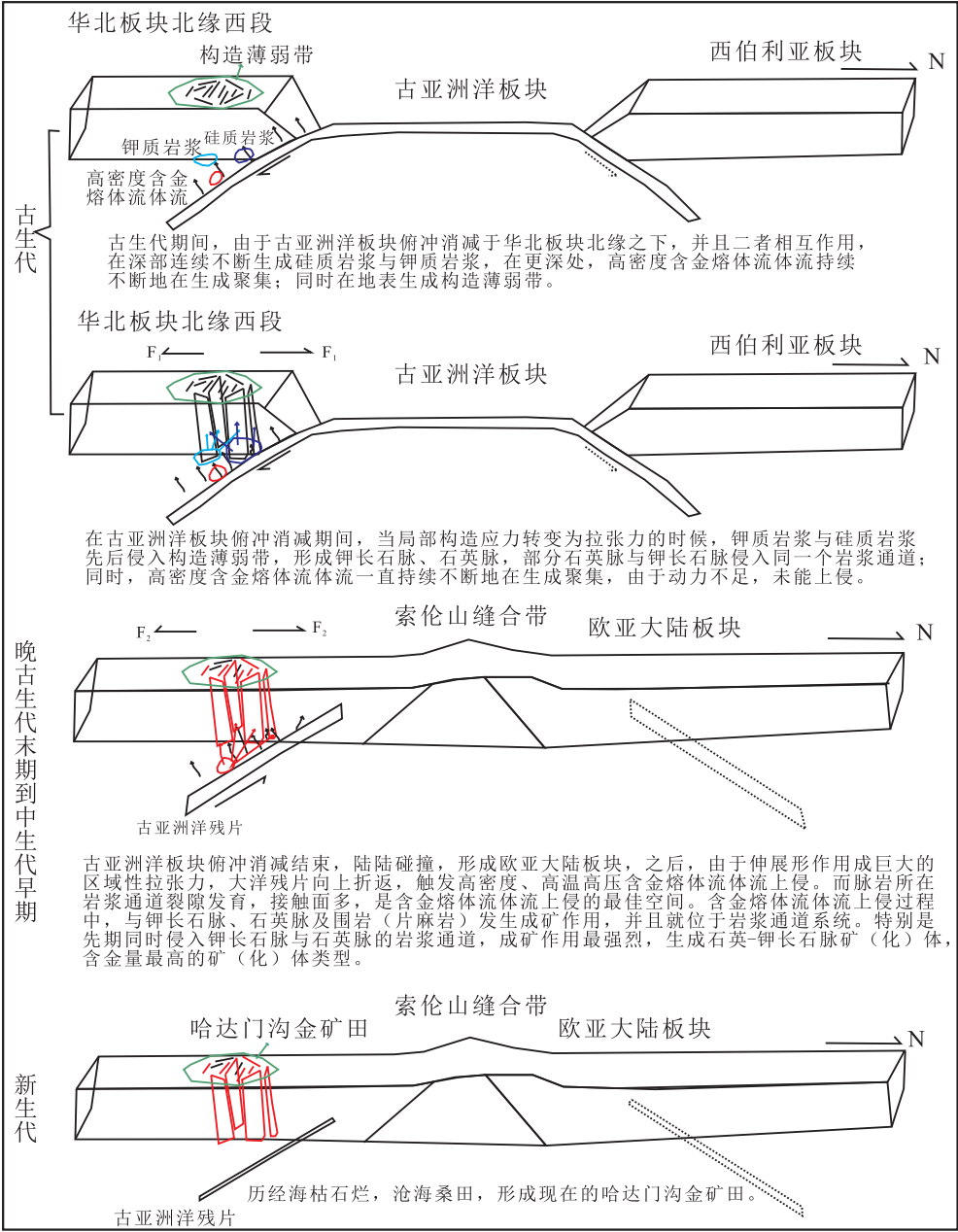


图 5 哈达门沟金矿田成岩成矿模式图

Fig. 5 Diagenetic and metallogenic model map of the Hadamengou gold ore field in Inner Mongolia

带成矿,最终形成哈达门沟金矿田。简言之,古亚洲洋俯冲期间,在哈达门沟地区形成构造薄弱带,同时在深部持续不断形成含 Au 熔体流体流,在阶段性拉张力的背景下,脉岩多次侵入,岩浆通道系统形成;古亚洲洋闭合之后,在区域性拉张应力作用下,高密度、高温、高压含 Au 熔体流体流在岩浆通道系统择优侵入成矿。

7 岩浆通道系统成矿理论应用意义

7.1 关于矿(化)体

一个矿(化)体 5 种表现形式相互转换,可以知道复脉型矿(化)体、石英脉型矿(化)体、钾长石脉型矿(化)体、石英-钾长石脉型矿(化)体、构造型矿(化)体,5 种矿(化)体类型同处一个岩浆通道体系,

形成同一个矿体,是同时成矿的,不可能是多期成矿。并且可以看出,脉岩先形成,最后在脉岩所在的岩浆通道发生矿化蚀变,也就是含 Au 熔体流体流上侵而成矿。

矿(化)体走向上大部分走向近东西,各个方向都有,充分说明在构造薄弱带由于脉岩的上侵先形成岩浆通道,然后才有含 Au 熔体流体流的上侵而成矿。因为每一个脉岩的走向都与形成脉岩时期的构造应力密切相关,只有形成成熟的岩浆通道,最后含 Au 熔体流体流才可以在拉张力的作用下沿着岩浆通道上侵成矿。

矿(化)体间距小,由几米到几十米均可见到,有部分相交。在矿(化)体交汇处,未见异常,与未相交矿(化)体相同。矿(化)体小间距,相交无异常也证实了一期成矿,而非多期成矿。

石英脉、钾长石脉矿(化)体含 Au 不均一性表明成矿时期受到含 Au 熔体流体流的成矿作用大小不同,两壁受到矿化蚀变作用强,含 Au 量大;而脉中央受到矿化蚀变作用弱,则含 Au 量相对小。岩浆通道深部的石英脉与钾长石脉复脉由于受到含 Au 熔体流体流强烈地矿化蚀变作用,成为石英-钾长石脉,故总体上石英-钾长石脉矿(化)体含 Au 量最高。脉型矿(化)体不同部位含 Au 不均一性,与各个不同类型矿(化)体含 Au 不相同性,说明了在矿田岩浆通道成矿理论的正确性。

7.2 关于矿石

矿田用于生产加工的矿石是石英脉型矿石、钾长石脉型矿石、石英-钾长石脉型矿石及蚀变岩型矿石,4 种矿石类型相互混杂在一起,很少见一个矿(化)体产出单一类型的矿石,主要是因为一个矿(化)体 5 种不同表现形式相互转换而引起的。石英脉型矿石源自石英脉型矿(化)体与复脉型矿(化)体;钾长石型矿石源自钾长石型矿(化)体与复脉型矿(化)体;石英-钾长石脉型矿石源自石英-钾长石脉型矿(化)体;蚀变岩型矿石源自蚀变岩型矿(化)体。特别是蚀变片麻岩矿石、蚀变辉绿岩矿石更加证实了含 Au 熔体流体流的存在,以及先有脉岩构造薄弱带、后成金矿的岩浆通道成矿理论。一个矿(化)体表现形式的多样性决定了矿石类型的复杂性,二者相互一致。哈达门沟金矿田矿石类型具有

复杂性、多样性,与岩浆通道成矿系统密不可分。

7.3 关于围岩蚀变与矿化

矿田内钾长石脉至少发生 2 期钾化,成岩期钾化与成矿期钾化。依据哈达门沟金矿田岩浆通道成矿理论,钾长石脉早期先形成,其后石英脉侵入上升,在钾长石脉接触带发生钾化,无金矿化,为成岩期钾化;最后由于含 Au 熔体流体流快速侵入上升,钾长石脉发生矿化蚀变而成的钾化,可见金矿化与金属硫化物。钾化发生于脉岩岩浆通道之内,所以 2 期钾化均为短期、快速而成。硅化主要形成于高温、高压含 Au 熔体流体流快速侵入之时,含 Au 熔体流体流于石英脉发生矿化蚀变,而后成矿。

黄铁矿化,矿田 2 期主要的黄铁矿化是成岩期黄铁矿化与成矿期黄铁矿化。成岩期黄铁矿化为早期黄铁矿化,是与硅质岩浆同时形成并与之一起侵入上升的,为石英脉自身携带之黄铁矿,是近硅质黄铁矿。成矿期黄铁矿化为后期黄铁矿化,为含 Au 熔体流体流的组分,由于高温、高压含 Au 熔体流体流快速上升,在岩浆通道内与围岩发生矿化蚀变,大部分黄铁矿无法充分结晶而呈细粒他形结构,并且由于侵入上升而具有流动性构造。黑色含 Au 挥发性组分是高温、高压含 Au 熔体流体流成分之一,烟灰色石英脉就是含 Au 熔体流体流含金挥发分所致。

绿泥石化、绿帘石化、绢云母化为哈达门沟金矿田外带蚀变,主要源自高温、高压熔体流体流与片麻岩的成矿作用,生成上述蚀变矿物。碳酸盐化是含 Au 熔体流体流中的二氧化碳与镁离子、钙离子发生化学反应形成碳酸镁、碳酸钙,是一种贯穿于整个蚀变带与矿(化)体的蚀变。

矿田有规律的内外蚀变分带主要由岩浆通道的结构所致。先期形成钾长石脉、石英脉脉岩岩浆通道,而后高温、高压含 Au 熔体流体流在岩浆通道系统内沿着石英脉、钾长石脉及片麻岩 3 个类型地质体的接触面侵入、上升,在岩浆通道中部与钾长石脉、石英脉发生成矿作用的同时,形成了硅化、钾化内蚀变带;在最外侧,高温、高压含 Au 熔体流体流与片麻岩发生矿化蚀变作用,形成绢云母化、绿泥石化,绿帘石化外侧蚀变带;而碳酸盐化位于内外蚀变带及矿(化)体中。

有规律的蚀变分带现象既说明了岩浆通道的存在与结构以及物质组成,也说明了含 Au 熔体流上侵,一期成矿(付斌等,2020)。如果多期成矿也就是一期热液成矿之后,再一次热液成矿(矿田只出现热液成矿证据,公认为热液矿床),那么势必打乱这种有规律的蚀变分带,矿化蚀变必将变得无比复杂。

矿(化)体 5 种表现形式、一个矿(化)体并存多种矿石类型和有规律的内外蚀变分带均统一解释于以钾长石脉、石英脉 2 次成脉岩,含 Au 熔体流体流一次成矿为主要内容的岩浆通道成矿系统理论。在构造薄弱带,由于拉张力的作用先后形成钾长石脉、石英脉,岩浆通道成型;在随后更大的区域性拉张力的情况下,高密度、高温、高压含 Au 熔体流体流侵入已形成的岩浆通道,与脉岩及最外侧围岩发生成矿作用,成矿以后,矿(化)体在岩浆通道就位。

7.4 其他

根据矿产资源的稀缺性,一个地区一次成矿已实属不易,但是多数学者认为哈达门沟金矿田是岩浆型矿床,多期成矿。依据之一是众多的测年数据之下统计结果的解释。测年矿物有的是蚀变矿物,有的是原生岩石中的矿物,有的是重熔型矿石中的矿物,当然所测数据迥然不同(付斌等,2020)。

哈达门沟金矿田多期成矿立论依据之二是脉岩及地质体的穿插切割关系。一个特例是矿田西侧的大桦背岩体切穿岩浆通道,以及岩浆通道内的钾长石脉、石英脉,此时含 Au 熔体流体流还未侵入,给人以大桦背岩体切穿矿(化)体的假象,让部分学者专家认为矿(化)体的形成时代早于大桦背岩体的形成时代(孟伟等,2002)。通过岩浆通道成矿理论,钾长石脉、石英脉最先侵入形成,而后大桦背岩体侵入,切穿钾长石脉、石英脉,最后含 Au 熔体流体流沿着构造薄弱带形成的岩浆通道上侵成矿,在岩体边部,岩体完好,由于缺少构造薄弱带而形成的岩浆通道,含 Au 熔体流体流未能侵入岩体之内而成矿。

哈达门沟金矿田岩浆通道系统成矿理论源自矿床地质特征,不仅可以指导今后正确的科研方向,而且可以为矿田内找矿指明方向。在深部探采结合找矿方面,采矿至矿(化)体深部,只要矿化蚀变在,或者脉岩在,或者岩浆通道在,深部就有矿,可以为矿山深部就矿找矿提供理论依据,可以提振矿山资源

信心,加大勘查投入,不会因为矿(化)体深部短暂的品位变低或者厚度变薄就放弃找矿。在地表找矿方面,根据 5 种矿(化)体表现形式,结合成矿必需要素——岩浆通道的存在与含 Au 熔体流体流形成的矿化蚀变可以收到较好的找矿效果。追根溯源,源自含 Au 熔体流体流形成的矿化与蚀变源头没有结束,矿就未尽。

关于世界范围内大多数石英脉型金矿床,许多一线探矿、采矿地质工作者早就注意到了,矿化蚀变在石英脉内部并不是均匀分布,并且是很有规律分布于石英脉两壁及围岩接触面,少数分布于石英脉裂隙之中。同时,石英脉脉体中部基本上是乳白色细粒致密坚硬,几乎没有矿化蚀变。这充分说明形成石英脉的硅质岩浆不含 Au,在石英脉形成之后,沿着接触面,含 Au 熔体流体流上侵成矿。所以石英脉型金矿成岩成矿模式同样为岩浆通道系统成岩成矿。关于脉岩型金矿床及哈达门沟金矿田,岩浆通道系统成矿的贡献在于:根据矿(化)体特征、脉岩特征及地质现象,敢于把矿(化)体分解为不同地质单元,从而明确地将成脉岩与成矿区区分开来,并且指出成矿作用晚于成岩作用;承认了矿床类型为岩浆型矿床,成岩作用方面阐明了什么岩浆形成何种岩石,而成矿作用阐明了矿化蚀变源自地球深部含 Au 熔体流。

总之,古生代古亚洲洋板块向华北板块北缘之下俯冲消减演化,孕育了哈达门沟金矿田的“源”——来自壳幔附近由于板块俯冲产生的高温、高压含 Au 熔体流体流(热液);早期钾长石脉、石英脉形成的岩浆通道系统的各个接触面为金矿床形成的“运”准备了必要条件;而岩浆通道系统内众多的裂隙、脉岩接触面及构造薄弱带为金矿床形成过程的“储”创造了优良条件;金矿床成型后的陆缘造山阶段为金矿床的“保”提供了有利地质条件;古亚洲洋闭合、华北板块与西伯利亚板块碰撞造山结束后的松弛伸展拉张力,成为高温、高压含 Au 熔体流体流上升成矿的“发动机”,岩浆通道成矿理论析出的矿床“源运储保”与翟裕生院士的矿床学成矿理论一致。

8 结论

在前人研究的基础上,利用岩浆通道成矿系统

理论的指导,通过对哈达门沟金矿田矿床地质特征与地质现象的仔细观察、分析,得出如下结论。

(1)哈达门沟金矿田矿床地质特征方面,总结出了矿(化)体、矿石及围岩蚀变矿化方面的地质现象与特征及规律。厘定了矿(化)体的5种表现形式、矿石的4种类型,并与矿化蚀变内外带相对应。

(2)依据矿床特征,可知哈达门沟金矿田岩浆通道系统成岩成矿模式。最先形成构造薄弱带;而后钾长石质岩浆、硅质岩浆侵入,形成钾长石脉、石英脉和岩浆通道,在这个阶段,经过2次成岩作用,同时形成了多个地质体的接触面。在后续地质演化中,石英脉、钾长石脉和最外侧片麻岩均不同程度地形成了大量裂隙。至此,所有的构造都已成型,包括脉岩之间的穿插切割关系;最后,源自地球深部的高密度、高温、高压含Au熔体流体流在古亚洲洋闭合,华北板块与西伯利亚板块碰撞之后拉张环境之下,从岩浆通道源源不断快速上升,伴随着高密度、高温、高压含Au熔体流体流的上侵,与石英脉、钾长石脉以及最外侧的片麻岩发生了成矿作用。当岩浆通道内同时存在钾长石脉、石英脉,并且成矿作用强烈的时候,形成了含Au量最高的石英-钾长石脉型矿(化)体,成矿作用不够强烈时,就形成复脉型矿(化)体,同时形成钾化、硅化内蚀变带;当岩浆通道内存在单脉时,就形成石英脉型矿(化)体或者钾长石脉型矿(化)体,同时形成钾化或者硅化内蚀变带;在岩浆通道最外侧,与片麻岩或者其他围岩发生矿化蚀变,形成蚀变岩型矿(化)体,同时形成绢云母化、绿泥石化、绿帘石化外蚀变带。岩浆通道既是成矿的场所,也是矿体就位的空间,矿体形成以后,经过一定的地质时期演化成如今的矿(化)体、矿石及围岩蚀变。

(3)哈达门沟金矿田岩浆通道系统成岩成矿模式成功地解释现有矿田研究的一些理论问题、地质现象,可以指明今后矿床研究方向;生产实践方面,对于矿山地表与深部探矿增储有重要意义。

致谢:审稿人在审稿过程中,对文章进行了非常认真细致地审阅,并且提出了非常中肯的建设性、重塑性的修改意见,对论文质量提高起到了极大的作用,在此表示衷心感谢;编辑部老师在成文工作中提出了宝贵的、规范性的建议和意见,在此一并深表谢意。

参考文献(References):

- 陈代鑫. 内蒙古哈达门沟金矿区控矿构造特征研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2015.
- CHEN Daixin. Study on the ore controlling structures features of the Hadamengou gold field in Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing),2015 (in Chinese with English abstract).
- 陈雪薇. 基于WorldView-2数据的内蒙古索伦地区遥感地质解译研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018.
- CHEN Xuewei. Geological structural interpretation of Sauron region based on worldview-2 data[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing),2018 (in Chinese with English abstract).
- 侯万荣,聂凤军,刘涛,等. 内蒙古哈达门沟金矿床成矿年代学研究[J]. 地质与勘探,2014,50(Z1):1213-1223.
- HOU Wanrong, NIE Fengjun, LIU Tao, et al. Mineralization epochs of the Hadamengou gold (molybdenum) deposit in Inner Mongolia[J]. Geology and Exploration, 2014,50 (Suppl.): 1213-1223 (in Chinese with English abstract).
- 付斌,翟利俊,潘振宇,等. 内蒙古哈达门沟金矿田金矿成矿年代厘定[J]. 黄金,2020,41(12):35-38.
- FU Bin, ZHAI Lijun, PAN Zhenning, et al. Determination of gold metallogenic age in the Hadamengou Field, Inner Mongolia[J]. Gold, 2020, 41 (12): 35-38 (in Chinese with English abstract).
- 郎殿有,李伟. 内蒙古乌拉山金矿带硫同位素特征研究[J]. 内蒙古地质,1998,(1):24-34.
- LANG Dianyou, LI Wei. Study gold ore belt Sulfur Isotopic characteristics in Wulashan, Inner Mongolia[J]. Inner Mongolia Geology, 1988, (1): 24-34 (in Chinese with English abstract).
- 李伟,张月忠. 内蒙古乌拉山金矿构造成矿作用浅析[J]. 黄金,2003,24(3):20-23.
- LI Wei, ZHANG Yuezhong. Tectonic mineralization in Wulashan Gold Deposit, Inner Mongolia[J]. Gold, 2003,24 (3):20-23 (in Chinese with English abstract).
- 李强之,陈衍景,徐登科,等. 哈达门沟金矿床单矿物金浸出

- 实验研究及其地质意义[J]. 矿床地质, 2003, 22(3): 271-277.
- LI Qiangzhi, CHEN Yanjing, XU Dengke, et al. An experimental study of gold leaching from host minerals of Hadamengou gold deposit and its geological implications [J]. Mineral Deposit, 2003, 22(3): 271-277 (in Chinese).
- 刘纲, 李伟, 喻万强, 等. 内蒙古包头市哈达门沟金矿田构造控矿规律及成矿预测[J]. 矿床地质, 2010, 29(增刊): 51-52.
- LIU Gang, LI Wei, YU Wanqiang, et al. Structural ore-controlling regulation and metallogenic prognosis of Hadamengou gold ore field in Baotou, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(Suppl.): 51-52 (in Chinese).
- 刘得文. 内蒙古哈达门沟金矿区构造变形特征与控矿构造研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- LIU Dewen. Study on the characteristics of structural deformation and ore-controlling structure in Hadamengou gold mining area, Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014 (in Chinese with English abstract).
- 罗照华, 魏阳, 辛后田, 等. 造山后脉岩组合的岩石成因—对岩石圈拆沉作用的约束[J]. 岩石学报, 2006, 22(6), 1672-1684.
- LUO Zhaohua, WEI Yang, XIN Houtian, et al. Petrogenesis of the post-orogenic dike complex—Constraints to lithosphere delamination[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(6), 1672-1684 (in Chinese with English abstract).
- 孟伟, 陈小伍, 李蒙文. 内蒙古哈达门沟金矿成矿时代及成矿阶段研究[J]. 黄金地质, 2002, 8(4): 13-18.
- MENG Wei, CHEN Xiaowu, LI Mengwen. Study on metallogenic epoch and metallogenic stages of the Hadamengou gold deposit, Inner Mongolia[J]. Gold, 2002, 8(4): 13-18 (in Chinese with English abstract).
- 聂凤军, 裴荣福, 吴良士, 等. 内蒙古乌拉山石英-钾长石脉金矿床铅和硫同位素研究[J]. 矿床地质, 1994, 13(2): 106-117.
- NIE Fengjun, PEI Rongfu, WU Liangshi, et al. Lead and Sulfur isotope studies of the WuLaShan K-feldspar and quartz vein gold deposit, southwestern Inner Mongolia [J]. Mineral Deposits, 1994, 13(2): 106-117 (in Chinese with English abstract).
- 沈华, 石强, 张晨. 内蒙古地区矿床成矿条件及绿色勘查潜力研究[J]. 世界有色金属, 2019, 2: 106-107.
- SHEN Hua, SHI Qiang, ZHANG Chen. Metallogenic conditions and green exploration potential of deposits in Inner Mongolia. [J]. World Nonferrous Metals, 2019, 2: 106-107 (in Chinese with English abstract).
- 苏尚国, 汤中立, 罗照华, 等. 岩浆通道系统成矿[J]. 岩石学报, 2014, 30(11): 3120-3130.
- SU Shangguo, TANG Zhongli, LUO Zhaohua, et al. Magmatic conduit metallogenic system[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(11): 3120-3130 (in Chinese with English abstract).
- 苏尚国, 汤中立. 岩浆通道成矿系统的理论与实践[J]. 矿床地质, 2010, 29(增刊1): 885-886.
- SU Shangguo, TANG Zhongli. Theory and practice of magmatic conduit metallogenic system[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(Suppl. 1): 885-886 (in Chinese).
- 辛向东, 刘纲. 内蒙古哈达门沟金矿床构造控矿规律及成矿预测[J]. 黄金, 2010, 31(12): 9-14.
- XIN Xiangdong, LIU Gang. Structural ore-controlling law and metallogenic prognosis of Hadamengou gold deposit in Inner Mongolia[J]. Gold, 2010, 31(12): 9-14 (in Chinese with English abstract).
- 薛建平, 陈海舰, 董明明. 内蒙古固阳 TTG 岩岩石成因、岩浆源区及构造环境[J]. 中国矿业, 2017a, 26(S1): 279-285.
- XUE Jianping, CHEN Haijian, DONG Mingming. Petrogenesis, magma source and tectonic setting of TTG rock from Guyang, Inner Mongolia[J]. China Mining Magazine, 2017a, 26(S1): 279-285 (in Chinese with English abstract).
- 薛建平, 陈海舰, 梁月升. 柳坝沟金矿床重要的找矿标志—钾长石化与硅化[J]. 内蒙古煤炭经济, 2013, 1: 6-8.
- XUE Jianping, CHEN Haijian, LIANG Yuesheng. A clue for further ore-finding about Liubagou gold deposit, Inner Mongolia—potassic and silicification[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2013, 1: 6-8.

- 薛建平,董明明,李成元. 内蒙古索伦山菱镁矿成矿地质条件与找矿潜力分析[J]. 地质与勘探, 2017c, 53(3): 464-471.
- XUE Jianping, DONG Mingming, LI Chengyuan. Metallogenic geological conditions and prospecting potential of the Solonker magnesite deposit in Inner Mongolia[J]. Geology and Exploration, 2017c, 53(3): 464-471 (in Chinese with English abstract).
- 薛建平,高军平. 哈达门沟金矿区成矿地质条件与找矿方向[J]. 内蒙古煤炭经济, 2010, 6: 111-113.
- XUE Jianping, GAO Junping. Ore-forming geological conditions and prospecting direction of the Hadamengou gold deposit, Inner Mongolia[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2010, 6: 111-113.
- 薛建平,李成元,董明明. 内蒙古索伦山地区风化淋滤型菱镁矿找矿前景[J]. 中国矿业, 2017d, 26(S1): 261-266.
- XUE Jianping, LI Chengyuan, DONG Mingming. The ore-search prospect of weathering-infiltration magnesite deposit in the Solonker area, Inner Mongolia[J]. China Mining Magazine, 2017d, 26(S1): 261-266 (in Chinese with English abstract).
- 薛建平,刘美玉,李钢柱,等. 内蒙古索伦山地区哈尔博格托尔 TTG 岩锆石年代学、岩石地球化学及大地构造意义[J]. 地学前缘, 2018a, 25(3): 230-239.
- XUE Jianping, LIU Meiyu, LI Gangzhu, et al. Zircon geochronology and geochemistry of TTG rock from Haer Bogetuoer of Solonker zone, Inner Mongolia and its tectonic implications[J]. Earth Science Frontiers, 2018a, 53(3): 230-239. (in Chinese with English abstract).
- 薛建平,苏尚国,陈海舰,等. 内蒙古索伦山地区地幔橄榄岩中豆荚状铬铁找矿前景[J]. 科学技术与工程, 2017e, 17(25): 25-32.
- XUE Jianping, SU Shangguo, CHEN Haijian, et al. The ore-search prospect for podiform chromite deposit in mantle peridotite in the Solonker area, Inner Mongolia[J]. Science Technology and Engineering, 2017e, 17(25): 25-32 (in Chinese with English abstract).
- 薛建平,苏尚国,李成元,等. 内蒙古索伦山地区蛇绿岩岩石单元地质特征、就位机制及时限[J]. 现代地质, 2017b, 31(3): 498-507.
- XUE Jianping, SU Shangguo, LI Chengyuan, et al. Geological characteristics, emplacement mechanisms and timing of the ophiolites in Solonker zone, Inner Mongolia[J]. Geoscience, 2017b, 31(3): 498-507 (in Chinese with English abstract).
- 薛建平. 内蒙古索伦山地区蛇绿岩、TTG 岩石组合及其大地构造意义[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2018b.
- XUE Jianping. The ophiolite and TTG assemblage in the Solonker area, Inner Mongolia, and their implications [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018b (in Chinese with English abstract).
- 翟裕生,苗来成,向运川,等. 华北克拉通绿岩带型金成矿系统初析[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2002, 27(5): 522-531.
- ZHAI Yusheng, MIAO Laicheng, XIANG Yunchuan, et al. Preliminary discussion on Gold Ore - Forming System in Greenstone Belt - Type of North China Craton [J]. Earth Science, 2002, 27(5): 522-531 (in Chinese).
- 张波,苏尚国,汤中立,等. 加拿大 Voisey's Bay Ni - Cu - Co 硫化物矿床岩浆通道成矿系统——小岩体成矿典型实例[J]. 西北地质, 2012, 45(4): 288-301.
- ZHANG Bo, SU Shangguo, TANG Zhongli, et al. The Magma Conduit System of Canada Voisey's Bay Ni - Cu - Co Sulfide Deposit——Representative Example of Small Intrusions Mineralization [J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 288-301.
- 张翰瑶. 内蒙古哈达门沟金矿区构造控矿特征研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2017.
- ZHANG Hanyao. Study on the characteristics of ore-controlling structures in the Hadamengou mining area, Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017 (in Chinese with English abstract).
- 张晓飞. 内蒙古中东部晚古生代—早中生代岩浆岩特征及区域构造内涵[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2018.
- ZHANG Xiaofei. Characteristics and regional tectonic implications of late Paleozoic - Early Mesozoic magmatic rocks from the central and southern Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract), 2018.
- 章永梅. 内蒙古柳坝沟-哈达门沟金矿田成因、控矿因素与

- 找矿方向[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2012.
- ZHANG Yongmei. Metallogenesis, ore-controlling factors and prospecting direction of the Liubagou - Hadamengou gold deposit, Inner Mongolia[D]. Beijing:China University of Geosciences (Beijing), 2012 (in Chinese with English abstract).
- 赵子贤. 新疆南阿尔金木纳布拉克构造混杂岩带物质组成及变形特征[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2018.
- ZHAO Zixian. Material composition and deformation characteristics of the Munabulake tectonic mélange belt in the south Altyn Tagn Xinjiang[D]. Beijing:China University of Geosciences (Beijing), 2018 (in Chinese with English abstract).
- 郑翻身, 徐国权, 冯贞, 等. 内蒙古中部地区绿岩型金矿地质特征及成矿远景预测[J]. 地质学报, 2005, 79(2): 232-248.
- ZHENG Fanshen, XU Guoquan, FENG Zhen, et al. Geological characteristics and prospective value of greenstone type gold deposits of central part of Inner Mongolia Autonomous Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(2): 232-248.
- 中国人民武装警察部队黄金指挥部. 内蒙古哈达门沟伟晶岩金矿地质[M]. 北京:地震出版社, 1995, 1-227.
- Gold Headquarters of the Chinese People's Armed Police Force. Geology of Hadamengou Pegmatitic Gold Deposit in Inner Mongolia Autonomous[M]. Beijing: Earthquake Press, 1995, 1-227.
- Ancochea E, Brandle J H, Huertas M J, et al. The felsic dikes of La Gomera (Canary Islands): identification of cone sheet and radial dike swarms[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2003, 120: 197-206.
- Evans - Lamswood D M, Butt D P, Jackson R S, et al. Physical controls associated with the distribution of sulfides in the Voisey's Bay Ni - Cu - Co deposit, Labrador[J]. Economic Geology, 2000, 95(4): 749-769.
- Gan S F, Qiu Y M, Yang H Y, et al. The Hadamengou Mine: a typical gold deposit in the Archean granulite facies terrane of the North China Craton[J]. International Geology Review, 1994, 36(9): 850-866.
- Li C, Naldrett A J and Ripley E M. Critical factors for the formation of a Ni - Cu deposit in evolved magmatic system: Lessons from a comparison of the Pants Lake and Voisey's Bay sulfide occurrences in Labrador[J]. Mineralium Deposita, 2001, 36(1): 85-92.
- Lightfoot P C, Keays R R, Evans - Lamswood D, et al. S saturation history of Nain Plutonic Suite mafic intrusions: Origin of the Voisey's Bay Ni - Cu - Co sulfide deposit, Labrador, Canada[J]. Mineralium Deposita, 2012, 47(1-2): 23-50.
- Naldrett A J, Fedorenko V A, Lightfoot P C. Ni - Cu - PGE deposits of the Noril'sk region, Siberia: Their formation in conduits for flood basalt volcanism. Trans. Inst[J]. Mining and Metall., London, 1995, 104: B18-B36.
- Naldrett A J. World class Ni - Cu - PGE deposits: Key factors in their genesis[J]. Mineralium Deposita, 1999, 34(3): 227-240.
- Naldrett A J. Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004, 727.
- Poland M P, Fink J H, Tauxe L. Patterns of magma flow in segmented silicic dikes at Summer Coon volcano, Colorado: AMS and thin section analysis[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 219: 155-169.
- Ressel M W, Noble D C, Henry C D, et al. Dike-hosted ores of the Beast Deposit and the importance of Eocene magmatism in gold mineralization of the Carlin Trend[J]. Nevada Economic Geology, 2000, 95: 1417-1444.
- Serrow J H, Leat P T, Wareham C D, et al. Geochemistry of mafic dykes in the Antarctic Peninsula continental-margin batholith: a record of arc evolution[J]. Contrib Mineral Petrol, 1998, 131: 289-305.
- Westerman D S, Dini A, Innocenti F, et al. When and where did hybridization occur? The case of a Monte Capanne Pluton, Italy[J]. Atlantic Geology, 2003, 39: 147-162.