

黑龙江乌拉嘎金矿成矿热力学参数研究

尹淑苹¹, 李永兵^{2,3}, 田会全^{2,3}, 刘善琪^{2,3}

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中科院计算地球动力学重点实验室, 北京 100049)

摘要: 本文通过对前人工作的总结, 在研究矿物共生关系的基础上将乌拉嘎金矿床的成矿作用过程划分为3个成矿阶段, 然后利用热力学数据计算出了各个阶段的成矿热力学参数。第1阶段: 黄铁矿-早期白色玉髓状石英阶段, Eh范围在-0.5~+0.3 V之间, 处于弱还原环境, 硫逸度应大于 10^{-23} ; 第2阶段: 烟灰色玉髓状石英-多金属硫化物阶段, 在低温时成矿环境为中性(pH=4)弱还原环境(Eh值为-1.0~-0.3 V), 硫逸度范围应大于 10^{-40} , 但不会超过 10^0 。同前一阶段相比, 硫逸度下限降低; 第3阶段: 碳酸盐-石英阶段, 碳酸盐矿物的出现预示着成矿已接近尾声, 成矿介质的pH值逐步从酸性(pH=3)向中性(pH=5)转变, 成矿Eh值也从弱还原(-0.5 V)向弱氧化(+0.3 V)过渡, 硫逸度下限范围大约在 10^{-23} 左右, 不超过 10^0 , 而氧逸度范围在 10^{-20} 左右。这对于深入探讨热液成矿作用过程具有重要参考价值。

关键词: 乌拉嘎金矿; 成矿阶段; Eh值; pH值; 氧逸度; 硫逸度

中图分类号: P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)04-0720-06

A study of thermodynamic parameters of the Wulaga gold deposit, Heilongjiang Province

YIN Shu-ping¹, LI Yong-bing^{2,3}, TIAN Hui-quan^{2,3} and LIU Shan-qi^{2,3}

(1. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Computational Geodynamics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on a study of mineral paragenetic relationship in combination with results obtained by previous researchers, the authors divided the metallogenic process of the Wulaga gold deposit into three ore-forming stages and figured out the ore-forming thermodynamic parameters of each stage according to thermodynamic data. The first stage was the pyrite-early white chalcedony-like quartz stage, during which Eh values varied in the range of -0.5~+0.3 V, implying a weak reduction environment, and sulfur fugacity should be higher than 10^{-23} ; the second stage was the ash-gray chalcedony-like quartz- polymetallic sulfide stage, during which the ore-forming environment at low temperature was an intermediate-acid (pH=4) weakly reducing environment, the sulfur fugacity should be higher than 10^{-40} but not in excess of 10^0 , and the lower limit of the sulfur fugacity decreased as compared with that of the first stage; the third stage was the carbonate-quartz stage, during which the formation of the carbonate minerals foreboded the ending of the mineralization, the pH values of the metallogenic media changed gradually from acid (pH=3) to intermediate-acid (pH=5), ore-forming Eh values also showed transition from weak reduction (-0.5 V) to weak oxidation (+0.3 V), the lower limit of the sulfur fugacity varied around 10^{-23} and was not in excess of 10^0 , and the oxygen fugacity varied around 10^{-20} . The data obtained by

收稿日期: 2013-12-05; 修订日期: 2014-05-23

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAB03B09)资助项目

作者简介: 尹淑苹(1982-), 女, 助理研究员, 矿物学、岩石学、矿床学研究方向; 通讯作者: 李永兵(1973-), 男, 博士, 副教授, 矿物学、岩石学、矿床学研究方向, E-mail: yongbingli@gucas.ac.cn

the authors are of important reference value for the in-depth investigation of the hydrothermal ore-forming process.

Key words: Wulaga deposit; ore-forming stages; Eh value; pH value; oxygen fugacity; sulfur fugacity

热力学计算、相图和矿物共生关系研究可以为半定量研究成岩成矿的热力学参数提供行之有效的途径,是近几年发展起来的热力学计算研究的热点和新点。已经有学者将其应用到吉林省安图县海沟金矿的研究中,并取得了较好的效果(刘善琪等,2013)。

乌拉嘎金矿床(又称团结沟金矿)是黑龙江省重要的黄金产地之一,一直备受地质学者的关注,大多认为属于浅成低温热液金矿床,关于该矿床的地质特征、成矿流体、包裹体、矿床成因、成矿年代以及成矿模型等研究已取得丰硕成果(Nei, 1991; 唐克东等, 1995; Sengor and NataIn, 1996; Hedenquist *et al.*, 1996; 李锦轶, 1998; Jahn *et al.*, 2000; 李凤友, 2001; 王永祥等, 2005; Li, 2006; 吴国学等, 2006; Wu *et al.*, 2007; 来又东, 2008; 李景强等, 2008; Zeng *et al.*, 2009, 2011a, 2011b; 王永彬等, 2012)。本文结合野外地质特征并参考近年来前人的研究成果,首次对其进行矿物共生关系以及热力学参数研究,讨论了乌拉嘎金矿床的成矿热力学参数和成矿物理化学条件,这对于深入探讨热液成矿作用过程具有重要意义。

1 区域地质背景

乌拉嘎金矿区处于滨西太平洋构造域与古亚洲构造域接合部的东北缘,属天山-兴蒙造山带,位于佳木斯地块和松嫩地块衔接构造的北端, NNE 向乌拉嘎深断裂带将佳木斯地块分割成西部的汤旺河-关松镇隆起、中部的嘉荫凹陷以及东部的太平沟凸起 3 部分,乌拉嘎金矿位于太平沟隆起与嘉荫凹陷交界处。自古生代到中生代先后受到了古亚洲洋和古太平洋演化的影响,具有多块体多阶段拼合的演化特征(唐克东等, 1995; 李锦轶, 1998; 李凤友, 2001; 王永祥等, 2005; 吴国学等, 2006; 来又东, 2008; 李景强等, 2008; 王永彬等, 2012)。

区内主要发育两套地层:下伏的一套绿片岩相-角闪岩相变质的元古宙黑龙江群变质岩层,主要分布于鹤岗凸起区;上覆地层为晚中生代宁远组中酸性陆相火山碎屑岩和火山熔岩建造,断续分布于乌拉嘎凹陷盆地两侧(李凤友, 2001; 王永祥等, 2005; 来又东, 2008; 李景强等, 2008; 孙丰月等, 2008; 胡云沪

等, 2010; 王永彬等, 2012; 徐九华等, 2012)。

本区发育有 3 期岩浆活动,包括吕梁期混合花岗岩和呈岩柱状分布的基性岩、华力西期岩基状花岗岩类以及侵位于黑龙江群中的燕山期小型斜长花岗岩斑岩。燕山期斜长花岗岩斑岩具有次火山岩特征,分布于乌拉嘎断陷东缘,且发育不同程度的破裂,在岩体和围岩的接触带尤甚,构成了矿体的主要容矿场所(李凤友, 2001; 王永祥等, 2005; 来又东, 2008; 李景强等, 2008; 胡云沪等, 2010; 王永彬等, 2012; 徐九华等, 2012)。

NNE 向的乌拉嘎深断裂控制着本区中生代岩浆活动,而乌拉嘎断裂的次一级 NWW 向张性断裂构造控制了矿体的展布及倾伏方向。矿体总体走向 270°~288°,倾向北,倾角多数在 20°~26°,矿体向北西侧伏,侧伏角 7°左右(李凤友, 2001; 吴国学等, 2006; 来又东, 2008; 李景强等, 2008; 胡云沪等, 2010)。

2 矿床地质特征及成矿阶段划分

乌拉嘎金矿床产出出于燕山期花岗岩和围岩黑龙江群的接触带附近,成矿与区内的花岗岩有密不可分的关系,所以确定花岗岩的年龄将对成矿时代做出很好的限定。前人的年代学研究表明,与成矿有关的花岗斑岩于早白垩世浅成侵入于黑龙江群中,据此推断成矿时代为早白垩世晚期(吴尚全, 1995; 聂喜涛, 2010; 王永彬等, 2012)。

矿石矿物主要为自然金、黄铁矿、白铁矿,少量为辉锑矿、自然银、闪锌矿、自然汞、方铅矿、黄铜矿、雄黄、雌黄、黄钾铁矾和褐铁矿等;脉石矿物有玉髓状石英、胶状蛋白石、碳酸盐、冰长石、绢云母、高岭土等,其中各种石英脉体是区内主要载金矿物。矿石结构多为胶状结构、粒状镶嵌结构、细粒状结构、碎裂结构、交代结构和反应边结构等;构造为脉状、网脉状构造、角砾状构造、胶状构造(李凤友, 2001; 王永祥等, 2005; 吴国学等, 2006; 来又东, 2008; 孙丰月等, 2008; 赵桂香等, 2009; 徐九华等, 2012)。

矿区围岩蚀变从矿体向外依次为硅化(玉髓状石英)-冰长石化-绢云母化-泥化-碳酸盐化,其中冰长石化和硅化是近矿的围岩蚀变,特别是硅化与成矿关系最为密切,灰黑色玉髓强烈发育处多为矿体

赋存部位。冰长石和碳酸盐的存在,显示成矿流体为近中性、还原的低温流体,冰长石化和碳酸盐化为典型的低硫化型浅成低温热液蚀变组合(Hedenquist *et al.*, 1996; 李凤友, 2001; 吴国学等, 2006; 张璟等, 2010)。

总结前人的研究成果、结合本文的工作,本文也

认为矿区金矿化可划分为3个阶段:①黄铁矿-早期白色玉髓状石英阶段;②烟灰色玉髓状石英-多金属硫化物阶段;③碳酸盐-石英阶段(霍亮, 2007; 徐九华等, 2012)。下文将对各成矿阶段的热力学参数进行计算,用于计算的某些相图和公式参考刘善琪等(2013)。

表1 乌拉嘎金矿的成矿阶段划分
Table 1 Metallogenic stages of the Wulaga gold deposit

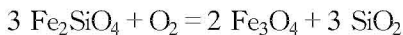
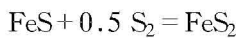
成矿阶段	矿石矿物组合	脉石矿物组合	均一温度范围/℃	均值/℃	压力均值/MPa
黄铁矿-早期白色玉髓状石英阶段	黄铁矿	石英	158.1~261.6	195.2	
烟灰色玉髓状石英-多金属硫化物阶段	黄铁矿、白铁矿、辉钨矿、黄铜矿、方铅矿	石英、冰长石	158.9~196.4	180.1	23.24
碳酸盐-石英阶段	少量黄铁矿	方解石、石英	151.3~315.2	225.2	

注:包裹体温度数据来源于曾庆栋等, 2012^①。

3 不同成矿阶段的 Eh-pH 值

3.1 黄铁矿-早期白色玉髓状石英阶段

野外工作发现,本阶段矿石矿物为黄铁矿,脉石矿物为石英。大量灰白色石英脉,有粒状黄铁矿及少量白铁矿生成。同时硅化蚀变作用沿围岩两侧强烈发育,表现为细粒状、脉状、角砾状硅化石英。此阶段包裹体均一温度为 158.1~261.6℃,均值为 195.2℃。通常在发生黄铁矿化和硅化的热液系统中可能发生如下化学反应:



可以根据上述反应利用能斯特方程大致估算该热液系统的 Eh 值。

由于该阶段没有发现与黄铁矿共生的磁铁矿和磁黄铁矿,所以该系统只能位于黄铁矿的稳定区域内(图1、图2、图3的深色实线区域内)。而黄铁矿是热液矿床中常见的硫化物,其不同温度下的 Eh-pH 稳定相图形状基本一致,但是随温度的增加 Eh 值范围向还原性强的方向偏移,但偏移幅度不大,而 pH 值的稳定区间很大,因此目前尚不能给出本阶段较为准确的 pH 值范围,但依据黄铁矿的稳定区大致可以断定 Eh 值范围在 -0.5~+0.3 V 之间,处于弱偏还原环境。

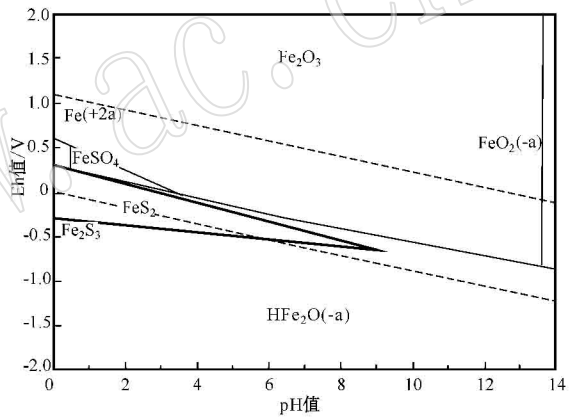


图1 158℃黄铁矿的 Eh-pH 相图

Fig. 1 Eh-pH phase diagram of pyrite at 158℃

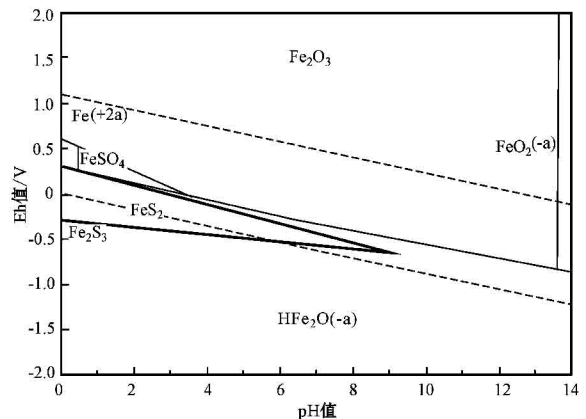


图2 195℃黄铁矿的 Eh-pH 相图

Fig. 2 Eh-pH phase diagram of pyrite at 195℃

① 曾庆栋, 刘建明, 褚少雄, 等. 2012. 辽吉黑有关地区金多金属矿成矿规模总结研究项目成果报告.

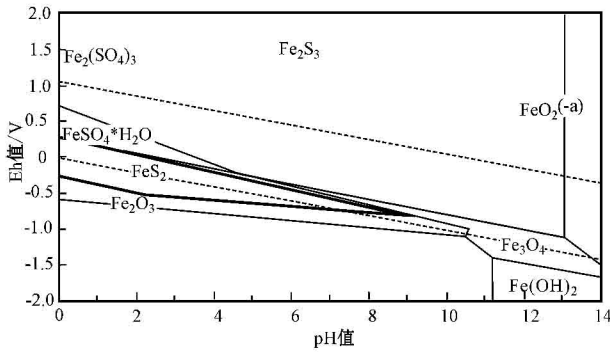


图 3 261°C 黄铁矿的 Eh-pH 相图

Fig. 3 Eh-pH phase diagram of pyrite at 261°C

3.2 烟灰色玉髓状石英-多金属硫化物阶段

本阶段矿石矿物为黄铁矿、白铁矿、辉锑矿、黄铜矿、方铅矿，脉石矿物为石英、冰长石。本阶段主要形成大小不等的胶状黄铁矿和烟灰色玉髓状石英脉，伴有强烈的硅化、绢云母化。常见晚期烟灰色玉髓状石英胶结早阶段白色玉髓状石英或白色石英角砾。该阶段是金矿化的主要阶段，同时伴有较多的白铁矿、辉锑矿、黄铜矿、方铅矿等硫化物。自然金主要赋存于烟灰色玉髓状石英和胶状黄铁矿或它们的裂隙中，矿物结晶粒度细，结晶程度差。灰黑色玉髓状石英强烈发育处多为矿体赋存部位。石英中包裹体均一温度为 158.9~196.4°C，均值为 180.1°C。

黄铁矿-黄铜矿-方铅矿组合是硫化物组合中比较常见的，本文仅给出均一温度下(181°C)的合成相图(图 4)，可以看出本成矿阶段在低温时闪锌矿形成，从其形成的物化条件可以明显看出在低温时成矿环境为中酸性(pH=4)，随温度的升高，还原性增强 Eh(-0.5~-0.3 V)，直到闪锌矿消失。而 PbS 和 FeS₂ 对 Eh-pH 范围都不敏感，可以估计整个成矿阶段为中酸性(pH 值 4 左右)，弱还原环境(Eh 值 -1.0~-0.3 V)。

3.3 碳酸盐-石英阶段

本阶段矿石矿物为黄铁矿，脉石矿物为方解石、石英。可见到方解石石英脉穿切早期形成的脉体，主要分布在远离矿体的斑岩内。碳酸盐矿物的出现预示着成矿作用过程已接近尾声。方解石中包裹体均一温度为 151.3~315.2°C，均值为 225.2°C。本成矿阶段的金属硫化物只看到黄铁矿，这也说明黄铁矿依赖的生长环境的相对宽松，在大多数环境下都可以形成。基于热力学计算可作出黄铁矿和方解石共生的 Eh-pH 图解，见图 5。图中红色、紫色、绿

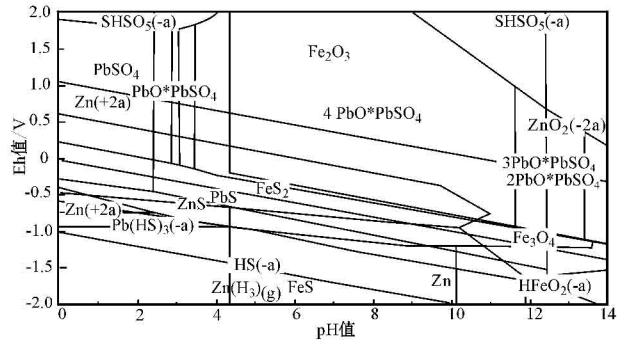


图 4 181°C 黄铁矿-黄铜矿-方铅矿组合相图

Fig. 4 Phase diagram of pyrite-chalcopyrite-galenite assemblage at 181°C

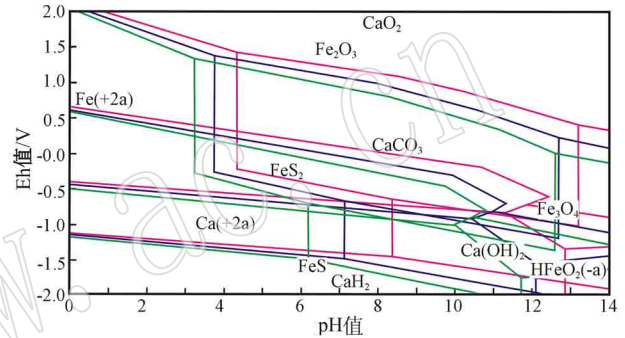


图 5 151°C、225°C 和 315°C 下黄铁矿和方解石共生相图

Fig. 5 Coexistence of pyrite and calcite at 151°C, 225°C and 315°C

色分别代表 151°C、225°C 和 315°C 下黄铁矿和方解石的共生相图，可见成矿后期成矿介质的 pH 值从高温到低温逐步从酸性(pH=3)向中酸性(pH=5)转变，成矿 Eh 值也从弱还原(-0.5 V)向弱氧化(+0.3 V)过渡。

4 不同成矿阶段的 $f_{O_2} - f_{S_2}$

4.1 黄铁矿-早期白色玉髓状石英阶段

参考刘善琪等(2013)对氧逸度和硫逸度的计算方法，依据 Fe-S-O 体系的氧逸度-硫逸度图(图 6)，可以大致估算本阶段硫逸度应大于 10^{-23} 。

4.2 烟灰色玉髓状石英-多金属硫化物阶段

参照图 7 可以看出黄铁矿、黄铜矿和方铅矿的 S 逸度共生变化范围广，在低温时硫逸度下限可以很低，但随着温度增高，生成这些矿物的最小硫逸度增加。其中 3 条粗竖线从左到右分别表示 230°C、320°C 和 500°C 下，3 种矿物稳定共生时的 S 逸度范围。本阶段硫逸度范围应大于 10^{-40} ，由于是弱还原环境，硫逸度不会超过 10^0 。同前一阶段相比，硫逸度

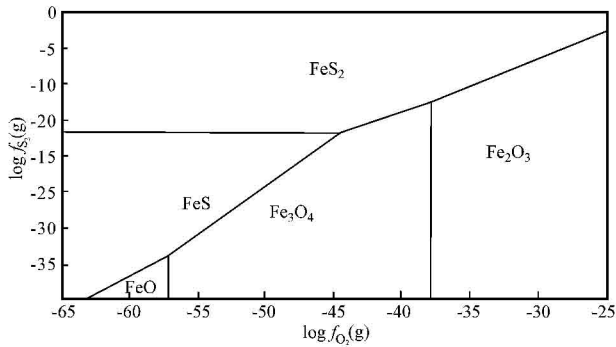


图 6 195°C Fe-S-O体系的氧逸度-硫逸度图
Fig. 6 Oxygen fugacity and sulfur fugacity of the Fe-S-O system at 195°C

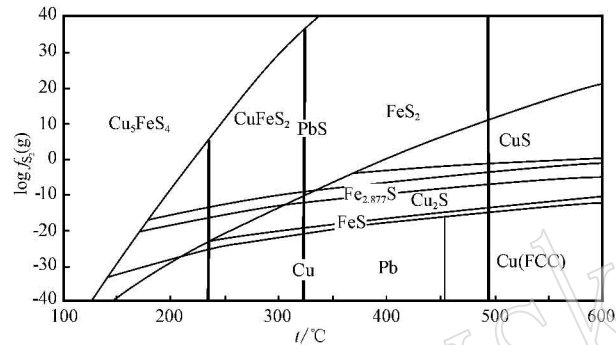


图 7 黄铜矿、黄铁矿、方铅矿 S 逸度变化图
Fig. 7 f_{S_2} variation diagram of chalcopyrite, pyrite and galena at different temperatures

下限变小。

4.3 碳酸盐-石英阶段

本成矿阶段只看到黄铁矿，从图 8 可以看出黄铁矿生长空间的硫逸度变化范围宽，随温度的升高， FeS_2 生成的 S 逸度下限逐步升高。氧逸度具有相似的规律。本成矿阶段硫逸度下限范围大约在 10^{-23} 左右，由于成矿环境为弱还原环境，硫逸度不会超过 10^0 。而氧逸度范围在 10^{-20} 左右，并且不同温度氧、硫逸度范围存在差异，并发生重叠。

5 结论

乌拉嘎金矿床的 3 个成矿阶段的成矿热力学参数特征如下：

(1) 黄铁矿-早期白色玉髓状石英阶段：目前不能给出本阶段 pH 值的范围，但依据黄铁矿的稳定区大致可以断定 Eh 范围在 $-0.5 \sim +0.3$ V 之间，处于弱偏还原环境。依据 Fe-S-O 体系的氧逸度-硫逸度图可以大致估算本阶段硫逸度应大于 10^{-23} 。

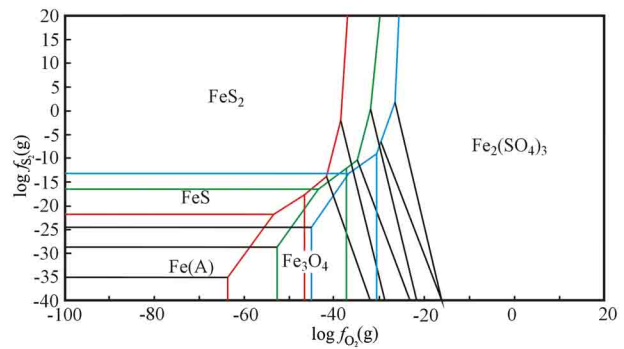


图 8 Fe-S-O体系的不同温度(151°C、225°C、315°C)下硫逸度与氧逸度关系
Fig. 8 Oxygen fugacity and sulfur fugacity of the Fe-S-O system at 151°C, 225°C, 315°C

(2) 烟灰色玉髓状石英-多金属硫化物阶段：本成矿阶段在低温时闪锌矿形成，从其形成的物化条件可以明显看出在低温时成矿环境为中性(pH = 4)，随温度的升高，还原性增强(Eh 值 $-0.5 \sim -0.3$ V)，直到闪锌矿消失。而 PbS 和 FeS_2 对 Eh-pH 范围都不敏感，可以估计整个成矿阶段为中性(pH 值 4 左右)，弱还原环境(Eh 值 $-1.0 \sim -0.3$ V)。从相图估测，本阶段硫逸度范围应大于 10^{-40} ，由于是弱还原环境，硫逸度不会超过 10^0 。同前一阶段相比，硫逸度下限变小。

(3) 碳酸盐-石英阶段：碳酸盐矿物的出现预示着成矿过程接近尾声，从黄铁矿与方解石矿物共生环境可以看出，成矿后期成矿介质的 pH 值从高温到低温逐步从酸性(pH = 3)向中性(pH = 5)转变，成矿 Eh 值也从弱还原(-0.5 V)向弱氧化($+0.3$ V)过渡。本成矿阶段黄铁矿生长空间的硫逸度变化范围宽，随温度的升高， FeS_2 生成的 S 逸度下限逐步升高。氧逸度具有相似的规律。本成矿阶段硫逸度下限范围大约在 10^{-23} 左右，由于成矿环境为弱还原环境，硫逸度不会超过 10^0 。而氧逸度范围在 10^{-20} 左右，并且不同温度氧、硫逸度范围存在差异，并发生重叠。

References

- Hedenquist J W, Izawa E, Arribas A, *et al.* 1996. NC. Epithermal Gold Deposits: Styles, Characteristics, and Exploration[M]. Resource Geology Special Publication Number 1. Tokyo: The Society of Resource Geology.
- Hu Yunhu, Chen Yuanrong and Sun Qin. 2010. Geochemical characteristics and significance of REE in different geological bodies in Wulaga Gold De-

- posit, Heilongjiang Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 30(3): 373~378(in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Wu F Y and Chen B. 2000. Granitoids of central Asian orogenic belt and continental growth in the Phanerozoic[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 91: 181~193.
- Li Fengyou. 2001. The Wulaga deposit model of ore-prospecting and its application[J]. *Gold*, 22(6): 11~12(in Chinese with English abstract).
- Li J Y. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26: 207~224.
- Li Jinyi. 1998. Some new ideas on tectonics of NE China and its neighboring areas[J]. *Geological Review*, 44(4): 339~347(in Chinese with English abstract).
- Li Jingqiang, Zhou Kun and Jin Tonghe. 2008. Geological characteristics and origin of Tuanjiegou gold deposit, Heilongjiang Province [J]. *Gold*, 29(6): 19~24(in Chinese with English abstract).
- Liu Shanqi, Li Yongbing, Zeng Qingdong, *et al.* 2013. The utilization of mineral association relationship to determine the metallogenic environment: A case study of the Haigou gold deposit[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(1): 99~105(in Chinese with English abstract).
- Nei S. 1991. Paleoclimatic and paleomagnetic constraints on the Paleozoic reconstructions of South China, North China and Tarim [J]. *Tectonophysics*, 196: 279~308.
- Sengor A M C and Natalin B A. 1996. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis[A]. Yin A and Harrison M. *The Tectonic Evolution of Asia* [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 486~640.
- Sun Fengyue, Wang Li, Huo Liang, *et al.* 2008. Fluid inclusion study on Wulaga gold deposit in Heilongjiang Province and implications for ore genesis[J]. *Geology in China*, 35(6): 1267~1273(in Chinese with English abstract).
- Tang Kedong, Wang Ying, He Guoqi, *et al.* 1995. Continental-margin structure of Northeast China and its adjacent areas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 69(1): 16~28(in Chinese with English abstract).
- Wang Yongbin, Liu Jianming, Sun Shouke, *et al.* 2012. Zircon U-Pb geochronology, petrogenesis and geological implication of ore-bearing granodiorite porphyry in the Wulaga gold deposit, Heilongjiang Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 557~570(in Chinese with English abstract).
- Wang Yongxiang, Wu Guoxue, Bai Shijun, *et al.* 2005. Characteristics of geology and geochemistry in Wulaga Gold Deposit[J]. *Global Geology*, 24(4): 338~343(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Yang J H, Lo C H, Wilde S A, *et al.* 2007. The Heilongjiang Group: A Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China[J]. *Island Arc*, 16: 156~172.
- Wu Guoxue, Li Shouyi, Ren Yunsheng, *et al.* 2006. The main factors of orebody controlling and induced polarization of gold finding effecting in Wulaga gold deposit[J]. *Progress in Geophysics*, 21(4): 1248~1251(in Chinese with English abstract).
- Xu Jihua, Wei Hao, Wang Haiyan, *et al.* 2012. Sub-volcanic hydrothermal mineralization of the Wulaga gold deposit, Heilongjiang, China: Evidences from melt and fluid inclusions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1305~1316(in Chinese with English abstract).
- Zeng Q D, Liu J M, Yu C M, *et al.* 2011a. Metal deposits in the Da Hinggan Mountains, NE China: styles, characteristics, and exploration potential[J]. *International Geology Review*, 53: 846~878.
- Zeng Q D, Liu J M, Zhang Z L, *et al.* 2009. Geology and lead-isotope study of the Baiyinnuoer Zn-Pb-Ag deposit, south segment of the Da Hinggan Mountains, Northeastern China[J]. *Resource Geology*, 59(2): 170~180.
- Zeng Q D, Liu J M, Zhang Z L, *et al.* 2011b. Geology and geochronology of the Xilamulun molybdenum metallogenic belt in eastern Inner Mongolia, China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 100: 1791~1809.
- Zhang Jing, Chen Yuanrong, Xie Taoyuan, *et al.* 2010. A tentative discussion on the genesis, ore-controlling regularity and prospecting direction of the Tuanjiegou gold deposit[J]. *Geology in China*, 37(6): 1710~1719(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 胡云沪, 陈远荣, 孙 芹. 2010. 黑龙江乌拉嘎金矿田不同地质体稀土元素特征及其地质意义[J]. *矿物学报*, 30(3): 373~378.
- 霍 亮. 2007. 黑龙江嘉荫县乌拉嘎机框矿床成因及预测[M]. 吉林大学.
- 来又东. 2008. 黑龙江乌拉嘎金矿床地质特征及矿化富集规律研究[M]. 吉林大学.
- 李凤友. 2001. 乌拉嘎金矿床找矿模型及其应用[J]. *黄金*, 22(6): 11~12.
- 李锦铁. 1998. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识[J]. *地质论评*, 44(4): 339~347.
- 李景强, 周 坤, 金同和. 2008. 黑龙江团结沟金矿床地质特征及矿床成因探讨[J]. *黄金*, 29(6): 19~24.
- 刘善琪, 李永兵, 曾庆栋, 等. 2013. 利用矿物共生关系确定成矿条件——以海金沟矿为例[J]. *岩石矿物学杂志*, 32(1): 99~105.
- 聂喜涛. 2010. 黑龙江省团结沟金矿床成矿地质背景与成矿模式研究[M]. 吉林大学.
- 孙丰月, 王 力, 霍 亮, 等. 2008. 黑龙江乌拉嘎大型金矿床流体包裹体特征及矿床成因研究[J]. *中国地质*, 35(6): 1267~1273.
- 唐克东, 王 莹, 何国琦, 等. 1995. 中国东北及东北邻区大陆边缘构造[J]. *地质学报*, 69(1): 16~28.
- 王永彬, 刘建明, 孙守恪, 等. 2012. 黑龙江省乌拉嘎金矿赋矿花岗岩闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄、岩石成因及其地质意义[J]. *岩石学报*, 28(2): 557~570.
- 王永祥, 吴国学, 白士俊, 等. 2005. 乌拉嘎金矿床地址地球化学特征研究[J]. *世界地质*, 24(4): 338~343.
- 吴国学, 李守义, 任云生, 等. 2006. 乌拉嘎金矿主要控矿因素与激电法找金效果[J]. *地球物理学进展*, 21(4): 1248~1251.
- 吴尚全. 1995. 黑龙江省团结沟斑岩金矿地质[M]. 地震出版社.
- 徐九华, 魏 浩, 王海燕, 等. 2012. 黑龙江乌拉嘎金矿的次火山岩浆-热液成矿: 熔体-流体包裹体证据[J]. *岩石学报*, 28(4): 1305~1316.
- 张 璟, 陈远荣, 谢桃园, 等. 2010. 团结沟金矿床成因、构造控矿规律与找矿方向浅析[J]. *中国地质*, 37(6): 1710~1719.
- 赵桂香, 张生义. 2009. 乌拉嘎金矿控矿因素特点与激电法找矿效果[J]. *矿业论坛*, 35: 1154~1155.