

doi:10.3799/dqkx.2016.009

吉林荒沟山金矿床成矿流体特征

周向斌^{1,2}, 李剑锋^{1,3,4}, 王可勇^{1,4}, 梁一鸿¹, 张淼¹, 韦烈民¹, 王志高¹

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061
2. 黑龙江省地质科学研究所, 黑龙江哈尔滨 150090
3. 辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁大连 116029
4. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 荒沟山金矿床为吉南老岭金—多金属成矿带内较具代表性矿床之一, 产于元古宇老岭群珍珠门组地层之中, 受韧性剪切带构造控制。按地质特征、矿物组合及矿脉之间的穿切关系, 将荒沟山金矿床热液成矿作用划分为 I 黄铁矿—毒砂—石英阶段和 II 晚期辉锑矿—乳白色石英两个阶段。系统的流体包裹体岩相学及显微测温研究表明: I 阶段石英中发育含 CO₂ 三相、碳质及气液两相 3 种类型的原生流体包裹体, 成矿流体属不混溶的中低温、低盐度 NaCl-H₂O-CO₂ 体系热液, 在成矿过程中发生过不混溶作用而导致金等有用元素沉淀富集; II 阶段石英颗粒中主要发育气液两相包裹体, 成矿流体属均匀的 NaCl-H₂O 体系热液。碳、氢、氧同位素研究表明, I 阶段成矿流体主要来源于岩浆热液, II 阶段流体除继承早阶段的热液外, 还有大气降水的混入; δD 和 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 值分析结果证明两个成矿阶段流体均与地层发生过较强的水岩反应, 矿床成因属于中温岩浆热液矿床。

关键词: 荒沟山金矿床; 成矿流体; 地球化学特征; 矿床成因; 吉林省东南部。

中图分类号: P611.1

文章编号: 1000-2383(2016)01-0121-10

收稿日期: 2015-09-01

Geochemical Characteristics of Ore-Forming Fluid in Huanggoushan Gold Deposit, Jilin Province

Zhou Xiangbin^{1,2}, Li Jianfeng^{1,3,4}, Wang Keyong^{1,4}, Liang Yihong¹, Zhang Miao¹, Wei Liemin¹, Wang Zhigao¹

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Heilongjiang Institute of Geological Science, Haerbin 150090, China

3. College of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

4. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Occurred in Zhenzhumen Formation of Laoling Group of Proterozoic Era and controlled by ductile shear belt, the Huanggoushan gold deposit is one of the most representative deposits in Laoling gold-polymetallic metallogenic belt in southern Jilin Province. Based on the geological characteristics, mineral assemblage and the crosscutting relationship between different kinds of veins, the hydrothermal mineralization processes can be divided into two main stages, namely, stage I pyrite arsenopyrite quartz and stage II later stibnite-milky quartz. Systematic study on petrography and microthermometry of fluid inclusions shows that quartz of Stage I contains three types of primary fluid inclusions, which are CO₂ bearing three phases, carbonic and aqueous two phases inclusions respectively, and the ore forming fluid is of medium to low temperature and low salinity NaCl-H₂O-CO₂ kind of solutions and immiscibility happened in the ore forming process, which led to the enrichment of gold etc; in quartz of Stage II, there are aqueous two phases fluids only and ore forming fluid is of homogeneous NaCl-H₂O kind of solutions. Isotopic studies of carbon, hydrogen and oxygen show that the ore forming fluids of mineralization Stage I mainly de-

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(No.1212011120156); 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题基金项目(No. GPMR201307); 辽宁师范大学青年基金项目(No.LS2015L016)。

作者简介: 周向斌(1975-), 男, 博士研究生, 主要从事矿产普查与勘探方面的研究工作。E-mail: 815852605@qq.com

* **通讯作者:** 李剑锋, E-mail: 317649474@qq.com

引用格式: 周向斌, 李剑锋, 王可勇, 等, 2016. 吉林荒沟山金矿床成矿流体特征. 地球科学, 41(1): 121-130.

rived from magmatic solutions, whereas fluids of mineralization stage II mainly came from meteoric water in addition to the relicts of stage I ore forming solutions. The values of δD and $\delta^{13}C_{V-PDB}$ reveal that the ore forming fluids of both mineralization Stage I and II all experienced strong rock water reaction. The genesis of the gold deposit is medium temperature magmatic hydrothermal deposit.

Key words: Huanggoushan gold deposit; ore-forming fluid; geochemical characteristics; ore genesis; southern Jilin Province.

荒沟山金矿床地处华北地台北缘辽—吉裂谷带北部边缘,太古宙地体与中元古界老岭群接触部位附近,为吉南老岭金—多金属成矿带内较具代表性矿床之一。自 20 世纪 80 年代中后期以来,对该成矿带矿床勘查工作取得较大进展,先后发现了南岔、八里沟、错草沟、荒沟山、大横路等金—铜—钴等矿床,其中,荒沟山金矿规模较大、矿石品位高,因而引起众多学者的关注。前人就该矿床类型归属及成因问题已开展过一定程度的研究工作,并提出了多种不同认识:王有维(1993)认为该矿床具有岩溶矿床特征,指出老岭群珍珠门组是矿源层;郑传久(1995)认为荒沟山金矿床属于浅成低温热液成因;魏小林等(2010)认为荒沟山金矿化主要与珍珠门组大理岩有关,矿床硫主要来自围岩和地壳深部岩浆的混源,得出该矿床为典型的低温热液硫化物脉型金矿床的认识;而杨言辰等(1999)则认为该金矿是一种与海底热液活动有关,并遭受热液和岩溶作用改造的微细浸染型金矿。这些研究成果对荒沟山金矿床成矿理论认识的提高起到了一定的促进作用,但到目前为止,对该矿床成矿流体地球化学特征、性质及演化问题的研究还很薄弱。众所周知,绝大多数矿床的形成都与不同来源的热液具有密切关系,而成矿流体的研究工作一直都是矿床学研究的重要课题之一(郑永飞和陈江峰,2000;卢焕章等,2004;Deng *et al.*, 2009)。本文通过对矿区不同成矿阶段样品流体包裹体岩相学、显微测温及 C、H、O 同位素研究,分析和总结了荒沟山金矿成矿流体来源、地球化学特征及演化规律,为矿床成因研究提供理论基础。

1 矿床地质特征

1.1 矿区地质

荒沟山金矿床位于吉林省东南部吉南老岭金—多金属成矿带的中部,地处华北板块北缘东段。研究区从早到晚分别经历了早元古代辽吉裂谷演化阶段、中元古代浑江裂陷槽演化阶段、新元古代—古生代上叠盆地演化阶段和中新元古代环太平洋陆缘活动带演化阶段(邵建波和范继璋,2004)。荒沟山金矿为

老岭成矿带上一中型金矿,矿床产于珍珠门组地层之中,受韧性剪切带构造控制(图 1)。

矿区出露地层主要有古元古界老岭群珍珠门组和大栗子组,两者产状基本一致,总体走向 NNE-SSW,倾向 SE,倾角为 $65^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。珍珠门组地层出露于矿区西部,主要由白云石大理岩、硅质条带白云石大理岩、角砾状白云石大理岩组成,岩石以富镁为特点(MgO 为 $16.5\%\sim 22.2\%$),具有菱镁质白云岩特征,构成富镁白云岩夹富硅、铁白云岩建造。在珍珠门组下部发育大量条纹、条带状的石英岩,中部夹有 $1\sim 15$ m 宽窄不等的角闪绿泥片岩;它们岩石化学成分在 Al-Fe-Mn 比率三角图和 $Fe/Ti-Al/(Al+Fe+Mn)$ 图上均落入热水沉积物区(Barrett *et al.*, 1990),反映在富镁白云岩建造形成时存在海底热水喷流及沉积作用(邢树文等,2010)。荒沟山金矿主要矿体即赋存于珍珠门组富镁白云岩建造下部的白云石大理岩夹石英岩中。大栗子组主要由绢云千枚岩、含碳绢云千枚岩、含电气石绢云千枚岩、绢云石英千枚岩、石英岩和电英岩组成,构成富硼、碳粘土岩建造。珍珠门组上覆于大栗子组之上,二者间为断层接触关系。

区内断裂构造十分发育,具有长期多次活动特点,主要构造呈 NE-NNE 向展布(图 1)。小四平—大南岔初—脆性剪切带是区域重要的控矿构造之一,沿小四平—荒沟山—大南岔一线断续分布有十余处金矿床和矿化点。该剪切带在矿区内展布方向与地层走向一致,总体上呈 NE 向延伸;剪切带主剪切面发育在两组地层接触面上,向两侧变形强度递减,带内出露一套超糜棱岩化、糜棱岩化的石英千枚岩、千枚岩、构造片岩及白云石大理岩、硅化白云石大理岩构成的构造岩带(郑传久,1995)。此外,区内还发育 NW-NWW 向的脆性断裂,该组断裂明显切割地层和韧性剪切带,为成矿后构造。已有研究表明,控矿剪切带构造经历了多期次变形作用过程,早期以韧性剪切变形为主,形成超糜棱岩化、糜棱岩化的石英千枚岩、千枚岩、构造片岩等岩石组合;后期叠加脆性破裂,形成碎裂化的白云石大理岩、硅化白云石大理岩,矿化主要沿后期脆性张性裂隙呈细、网脉形式产出(图 2),反映出成矿作用与晚期脆性叠加构造变形有直接关系的

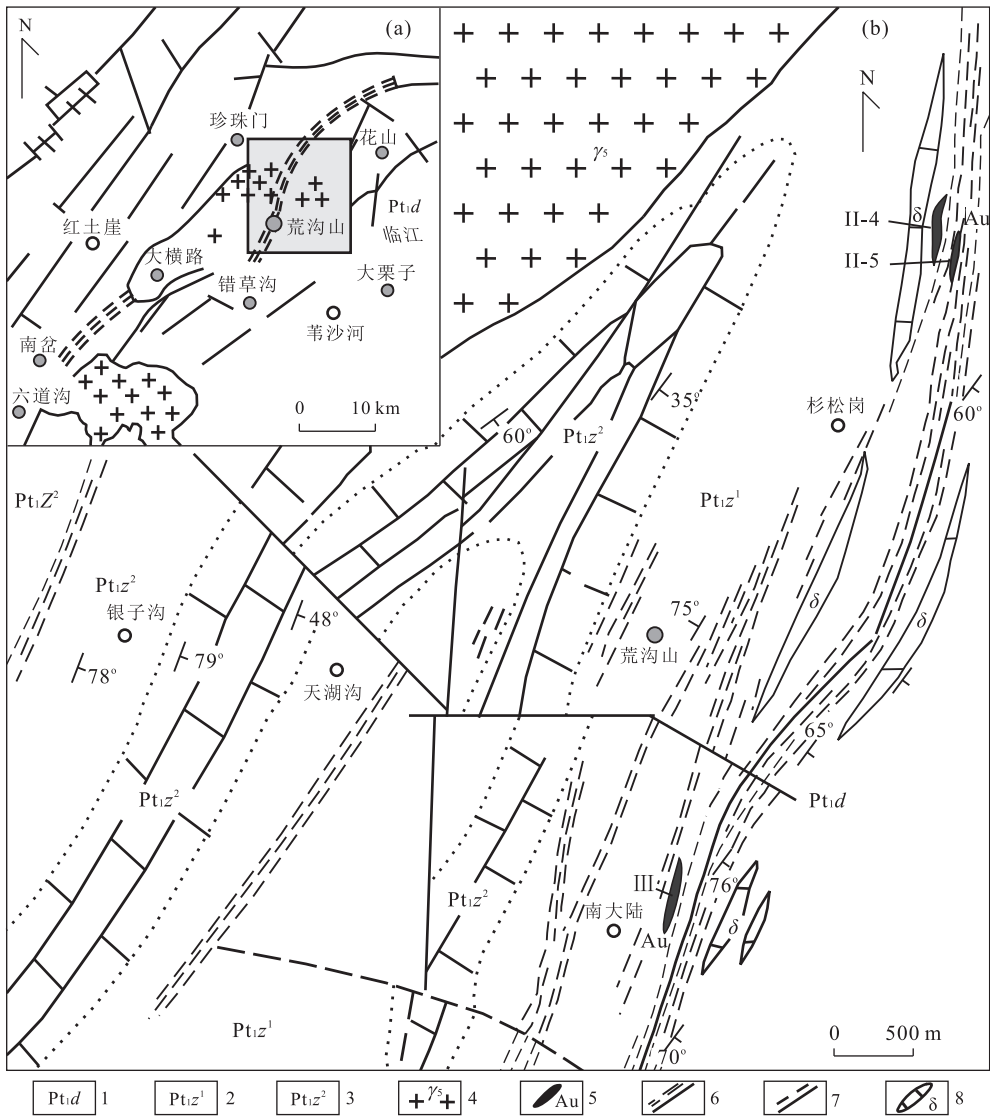


图 1 荒沟山金矿床地质简图

Fig.1 Geological sketch map of Huanggoushan gold deposit

1.古元古界大栗子组片岩;2.古元古界珍珠门组下段含碳硅质条纹条带大理岩;3.珍珠门组中段白云石大理岩、硅质条带白云石大理岩及角砾状白云石大理岩;4.中侏罗世似斑状黑云母花岗岩;5.金矿体;6.初-脆性剪切带;7.脆性断层;8.闪长岩脉;据杨言辰等(2002)修改

特点(郑传久,1995;杨言辰等,2002)。

区内主要侵入体为呈岩基状产出的老秃顶子岩体,其主要组成岩性为似斑状黑云母花岗岩;分布于矿区北部,与珍珠门组地层呈侵入接触关系。岩石新鲜面呈灰白色、淡红色,似斑状结构,块状构造;主要组成矿物为石英(25%)、钾长石(20%)、斜长石(35%)和黑云母(15%)。斑晶矿物主要为钾长石和条纹长石;副矿物主要为磁铁矿、锆石及磷灰石。秦亚等(2013)采用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法对区内老秃顶子进行定年分析,结果显示老秃顶子岩体形成于 178.74 ± 0.90 Ma,同时结合岩石地球化学分析结果,指出其形成可能与古太平洋板块的俯冲有关。

矿区还发育大量中基性、中酸性脉岩,主要有花岗斑岩脉、石英斑岩脉、二长斑岩脉、闪长岩脉、闪长玢岩脉及辉绿岩脉等,它们均为中生代岩浆作用产物,侵入顺序为辉绿岩—无矿闪长岩—含矿闪长岩—煌斑岩(赵彦明等,1993)。

1.2 矿化特征

荒沟山金矿区工业矿体主要赋存于珍珠门组下段含碳硅质条纹条带大理岩中,矿体由含金硫化物硅质岩组成,储量达中型规模。目前,区内共查明 7 个矿脉群、28 个矿体。根据矿体与围岩产状关系可划分为层状矿体和脉状矿体 2 种类型(杨言辰等,1999,2002)。层状矿体由灰黑色细粒石英和少量硫化物、金

矿物构成,产状与围岩基本一致,走向 NNE,倾向 NW 或 SE,倾角为 $60^{\circ}\sim 87^{\circ}$,矿石金品位为 $5\sim 8\text{ g/t}$,平均 7.2 g/t .矿体多呈隐伏或半隐伏状态产出,形态规则,延长延伸稳定,矿体一般长 $50\sim 200\text{ m}$,最大 230 m ,平均 $65\sim 90\text{ m}$;延深一般 $30\sim 250\text{ m}$,最大 $380\sim 450\text{ m}$;厚一般 $0.5\sim 2.5\text{ m}$,最厚达 3.78 m .

脉状、网脉状矿体由浅灰色细粒石英和少量硫化物、金矿物组成,多呈隐伏或半隐伏状态产出于层状矿体一侧或尖灭端,形态以囊状或分枝脉状为主.脉状产出常与层状矿体大角度斜交,走向呈近 EW,北倾,倾角为 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$,矿体形态较稳定,延长 $60\sim 200\text{ m}$,延深 $60\sim 90\text{ m}$,矿石金品位较高,为 $3\sim 249\text{ g/t}$,金含量稳定,构成重要工业矿体;若以网脉状产出,则形态不规则,且矿石以角砾状构造为特征.

荒沟山金矿矿石类型以原生贫硫化物型为主,氧化矿石仅在地表及浅部氧化带中发育.区内矿石矿物组成简单,主要金属矿物有黄铁矿、毒砂和辉锑矿,次为自然金、磁黄铁矿、闪锌矿、深红银矿、磁铁矿、方铅矿等;脉石矿物以石英、白云石为主,方解石、绢云母等少量;次生矿物有孔雀石、蓝铜矿、褐铁矿等.矿石中金属硫化物总量较低,为 $2\%\sim 8\%$,金多以自然金形式产出,形状有枝状、粒状、条板状和不规则状,多分布于矿物中或矿物间以包体金、裂隙

金、粒间金的形式产出(杨言辰等,2002).

矿石结构较复杂,主要类型有自形粒状结构、他形一半自形粒状结构、浸蚀(交代)结构、固溶体结构、压碎结构、交代残余结构、假像结构、骸晶结构、纤维状结构等,此外尚见有片状结构和充填结构.常见的矿石构造有:条带状一条纹状构造、致密块状构造、角砾状构造、网脉状构造、细脉浸染状构造和蜂窝状构造等.

区内与矿化关系密切的围岩蚀变主要有硅化、绢云母化、铁白云石化等,大体为一套中低温矿物组合.其中,硅化与成矿关系最为密切,发育最为广泛;主要表现为岩石被微细粒石英交代,交代作用强烈时可形成绢云母微细粒石英交代岩,或呈石英细脉、网脉交代岩石.

根据系统地野外观察与详细的室内岩、矿鉴定工作,结合前人的研究成果,将该矿床热液成矿作用划分为 I 黄铁矿—毒砂—石英阶段和 II 辉锑矿—乳白色石英阶段(图 2).

2 流体包裹体研究

本次工作在矿区选取代表性样品共 20 件,其中

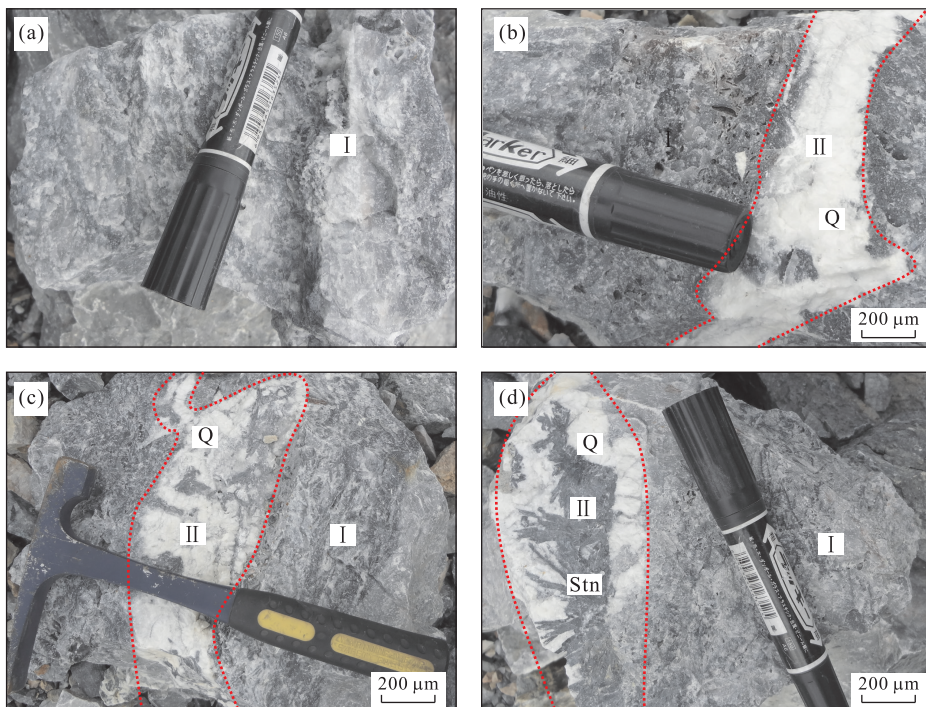


图 2 荒沟山金矿区不同成矿阶段样品照片

Fig.2 Photographs of different stages sample in Huanggoushan gold deposit

Q.石英;Stn.辉锑矿;a.黄铁矿—毒砂—石英(I)阶段矿石;b~d.辉锑矿—乳白色石英脉(II)穿切I阶段矿体

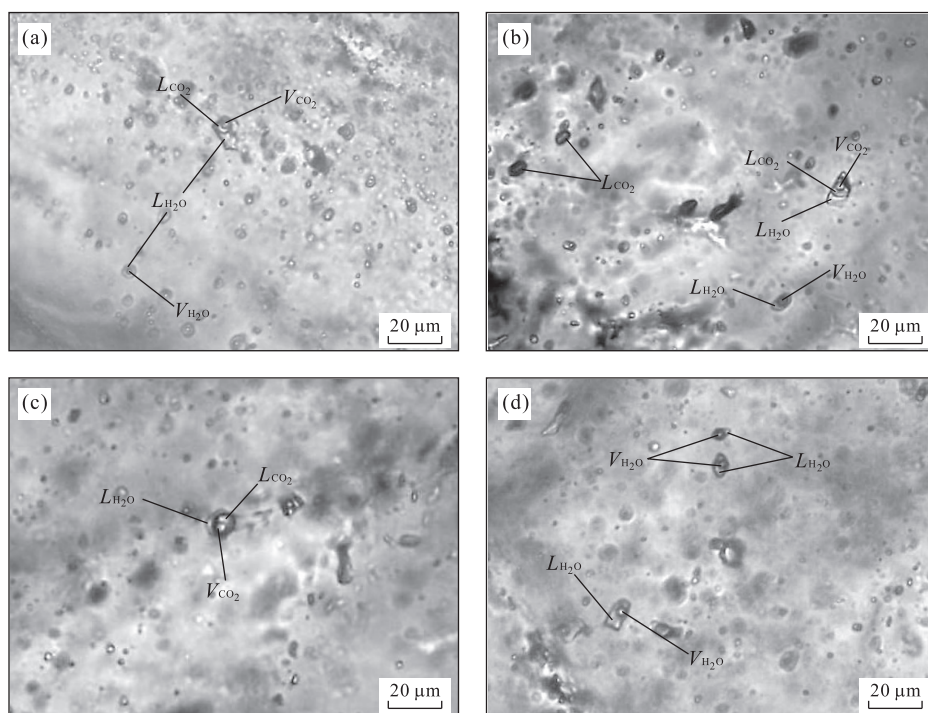


图 3 荒沟山金矿床流体包裹体显微照片

Fig.3 Photographs of fluid inclusions of Huanggoushan gold deposit

L_{CO_2} , 液态 CO_2 ; V_{CO_2} , 气态 CO_2 ; L_{H_2O} , 液态水; V_{H_2O} , 气态水; a~c. 黄铁矿-毒砂-石英阶段; d. 辉锑矿-乳白色石英阶段

黄铁矿-毒砂-石英阶段样品 10 件, 晚期辉锑矿-乳白色石英阶段样品 10 件。将上述样品磨制成厚约 0.2 mm 的测温片, 对石英颗粒中发育的流体包裹体特征进行了系统研究。流体包裹体岩相学、显微测温及激光拉曼光谱分析工作在吉林大学地球科学学院地质流体实验室完成, 使用仪器为英国 Linkam THMS-600 型冷热两用台, 测温精度 $<31\text{ }^\circ\text{C}$ 时为 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$, $>31\text{ }^\circ\text{C}$ 时为 $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$; 激光拉曼使用仪器为英国 Renishaw System-1000 型激光拉曼光谱仪, 测试条件及测试精度见文献(王可勇等, 2010)。

2.1 流体包裹体岩相学

流体包裹体镜下研究表明, 本次研究的样品石英中原生流体包裹体均较为发育, 类型有所不同, 依室温下的相态特征可划分为含 CO_2 三相、碳质及气

液两相 3 种类型的原生流体包裹体, 同类包裹体在大小、形态、产状及相态特征等各方面相近, 现描述如下:

(1) 含 CO_2 三相包裹体: 该类包裹体由液体 CO_2 、气体 CO_2 及液体水组成, CO_2 所占比例为 15%~80%, 多数集中在 25~40%; 包裹体大小为 4~16 μm , 多数在 6~12 μm 之间, 其形态一般为较规则的椭圆形、长条状。在石英颗粒中, 该类包裹体多随机分布, 显示原生流体包裹体特征(图 3a~3c)。

(2) 碳质流体包裹体: 该类包裹体在室温下由液态 CO_2 组成, 包裹体大小为 4~16 μm , 多数在 6~12 μm 之间, 其形态一般为较规则的椭圆形、长条状。在石英颗粒中, 该类包裹体多随机分布或与含 CO_2 三相包裹体共生, 为原生流体包裹体(图 3b)。

表 1 荒沟山金矿床流体包裹体测温结果

Table 1 The microthermometric results of fluid inclusions in Huanggoushan gold deposit

矿石类型	类型(数量)	固相 CO_2 融化温度($^\circ\text{C}$)	笼形物消失温度($^\circ\text{C}$)	CO_2 相部分均一温度($^\circ\text{C}$)	冰点温度($^\circ\text{C}$)	完全均一温度($^\circ\text{C}$)	盐度(%NaCl eqv)	密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
黄铁矿-毒砂-石英阶段	含 CO_2 三相包裹体	-56.6~-60.9	4.1~8.6	9.5~28.8		173~327	2.81~10.44	0.54~1.43
	CO_2 包裹体	-57.0~-57.9		-14.6~7.7				0.87~1.05
辉锑矿-乳白色石英阶段	气液两相包裹体				-2.9~-6.8	120~260	4.80~10.49	0.86~1.01
	气液两相包裹体				-2.1~-5.5	159~260	3.07~8.55	0.86~0.95

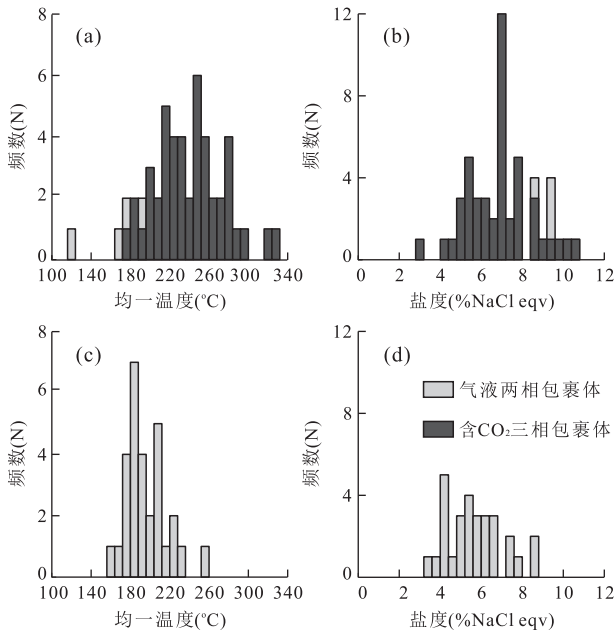


图 4 荒沟山金矿区矿区不同成矿阶段流体包裹体均一温度、盐度直方图

Fig.4 The histograms of homogeneous temperature and salinity of different stages of fluid inclusions in Huanggoushan gold deposit

a、b.黄铁矿-毒砂-石英阶段;c、d.黄铁矿-毒砂-石英阶段

(3)气液两相包裹体:该类包裹体在所有样品中均有发育,由气泡及水溶液相两相构成,气液比一般为5%~35%.包裹体大小为2~18 μm,多数在6~12 μm之间,其形态一般为较规则的椭圆形、长条

状.在石英颗粒中,该类包裹体多随机分布,显示原生流体包裹体特征(图 3a 和 3d).

2.2 流体包裹体显微测温

利用 Linkam THMS-600 冷热两用台对样品中各类型包裹体进行了系统的显微测温研究,包裹体测温盐度及密度数据使用 MacFlinconr 计算程序完成(Brown and Hagemann,1995),结果见表 1 和图 4.由测温结果可以得出:

黄铁矿-毒砂-石英阶段石英颗粒中主要发育含 CO₂ 三相包裹体、CO₂ 包裹体、气液两相包裹体(图 3a~3c).含 CO₂ 三相包裹体固相 CO₂ 熔化温度为-56.6~-60.9 °C,CO₂ 笼形物消失温度为 4.5~8.6 °C,相应盐度为(2.81~10.44)% NaCl eqv;包裹体部分均一温度为 9.5~28.8 °C,完全均一温度为 173~327 °C,根据包裹体盐度及均一温度,估算包裹体密度为 0.54~1.43 g/cm³.碳质包裹体初融温度为-57.0~-57.9 °C,均一温度为-14.6~7.7 °C,密度为 0.87~1.05 g/cm³.气液两相包裹体冰点温度为-2.9~-7.0 °C,相应盐度为(4.80~10.24)% NaCl eqv;包裹体均一温度为 120~260 °C,根据包裹体盐度及均一温度,估算包裹体密度为 0.86~1.01 g/cm³.

辉锑矿-乳白色石英阶段石英颗粒中主要发育气液两相包裹体(图 3d).测得包裹体冰点温度为-2.1~-5.5 °C,相应盐度为(3.07~8.55)% NaCl eqv;包裹体均一温度为 159~260 °C,估算其密度为 0.86~0.95 g/cm³.

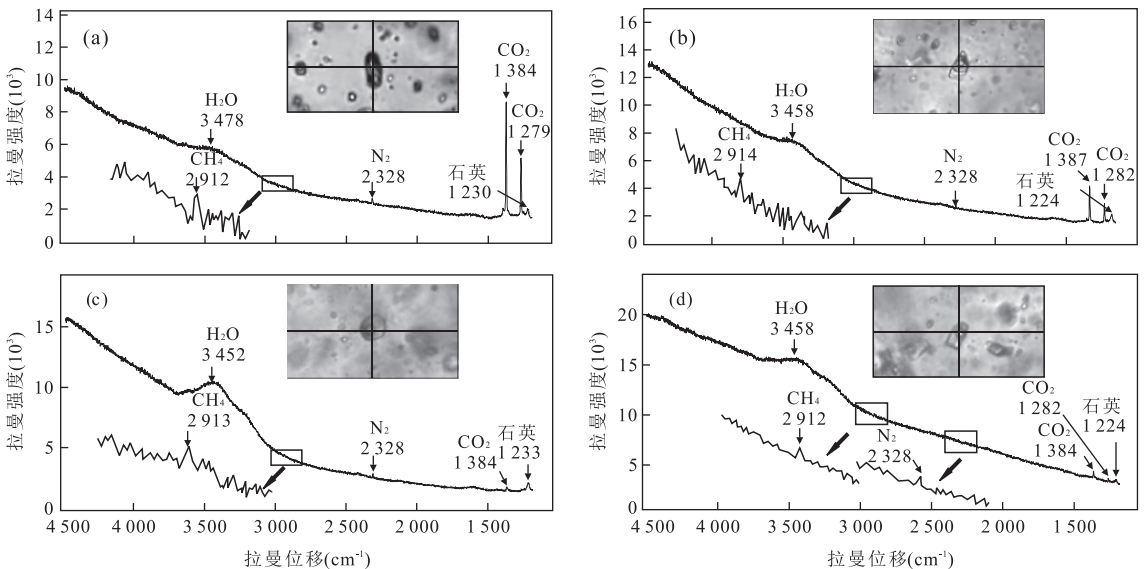


图 5 荒沟山金矿床流体包裹体激光拉曼光谱分析结果

Fig.5 The results of laser Raman analyses of fluid inclusions in Huanggoushan gold deposit

a. I 阶段 CO₂ 包裹体;b. I 阶段含 CO₂ 三相包裹体;c. I 阶段气液两相包裹体;d. II 阶段气液两相包裹体

2.3 流体包裹体激光拉曼成分分析

对荒沟山金矿床两个成矿阶段石英中不同类型包裹体进行了激光拉曼光谱分析(图 5),结果表明:黄铁矿-毒砂-石英阶段石英中 CO₂ 包裹体成分具有明显的 CO₂ 峰值,含有少量的 CH₄、N₂ 及 H₂O;气液两相包裹体成分以 H₂O 为主,含有少量的 CH₄、N₂ 和 CO₂;含 CO₂ 三相包裹体成分主要为 H₂O 和 CO₂,含有少量的 CH₄ 及 N₂.辉锑矿-乳白色石英阶段石英中气液两相包裹体成分以 H₂O 为主,也同样含有少量的 CH₄、N₂ 和 CO₂.

3 矿床成因分析与讨论

3.1 成矿 P/T 条件

鉴于该矿床 I 成矿阶段存在流体不混溶作用,可以根据不混溶体系包裹体测温结果对荒沟山金矿成矿作用的温、压条件进行限定.根据盐水溶液和碳质流体包裹体等容线相交法估算本区 I 阶段金矿化形成温度为 280 ~ 320 °C,成矿压力为 1.7 ~ 2.5 Kbar;按照上地壳古地压梯度 0.026 5 Gpa/km (李向文等,2013),估算成矿深度应在 5 km 以下.

3.2 成矿流体来源分析

为对荒沟山金矿床成矿流体来源问题进行分析与讨论,本次工作挑选出 6 件样品进行 C、H、O 同位素分析,其中 HJ-2a、HJ-2b、HJSL-a、HJSL-b 为 I 黄铁矿-毒砂-石英阶段样品,HJ-4a、HJ-4b 取自 II 辉锑矿-乳白色石英阶段.样品在核工业地质矿产研究所实验室中心完成,采用 MAT253EM 质谱仪进行测试分析,碳和氧同位素的分析精度为 ± 0.2 × 10⁻³,氢同位素的分析精度为 ± 2‰;结果见表 2.计算石英单矿物中流体包裹体 δ¹⁸O_{H₂O} 时,根据 Clayton *et al.* (1972) 公式:δ¹⁸O_{V-SMOW} - δ¹⁸O_{H₂O} = 3.38 × 10⁶ / T² - 2.9 计算.结合上文包裹体分析结果,I 阶段成矿温度选用 280 °C;II 阶段包裹体均一

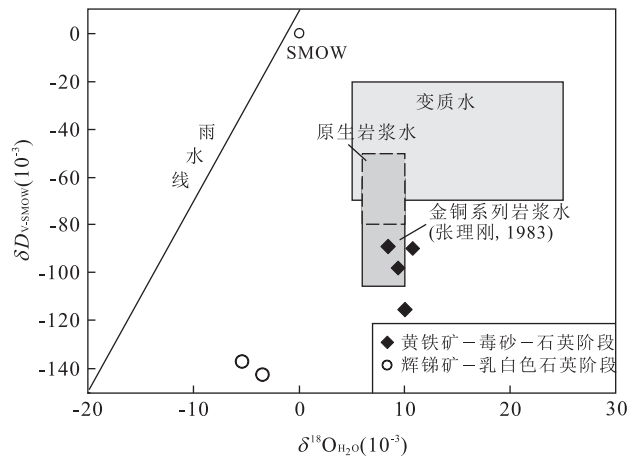


图 6 流体包裹体氢-氧同位素组成图解

Fig.6 The composition of hydrogen-oxygen isotope of fluid inclusions

底图据张理刚等(1985)

温度剔除个别高温数据后,选取接近成矿温度的最大值 220 °C.

根据分析数据可知,区内两个成矿阶段石英样品的 δD、δ¹⁸O_{H₂O-SMOW} 及 δ¹³C_{V-PDB} 值具有明显的差异:黄铁矿-毒砂-石英阶段样品的 δD 介于 -94.6 × 10⁻³ ~ -118.0 × 10⁻³ 之间,δ¹⁸O_{H₂O-SMOW} 值介于 9.1 × 10⁻³ ~ 10.3 × 10⁻³ 之间,δ¹³C_{V-PDB} 值介于 -4.3 × 10⁻³ ~ -7.6 × 10⁻³ 之间;辉锑矿-乳白色石英阶段样品的 δD 介于 -133.5 × 10⁻³ ~ -138.6 × 10⁻³ 之间,δ¹⁸O_{H₂O-SMOW} 值介于 -2.2 × 10⁻³ ~ -4.0 × 10⁻³ 之间,δ¹³C_{V-PDB} 值介于 -1.9 × 10⁻³ ~ -2.4 × 10⁻³ 之间.整体来看,黄铁矿-毒砂-石英阶段样品的 δD 及 δ¹⁸O_{H₂O-SMOW} 值明显高于辉锑矿-乳白色石英阶段,而 δ¹³C_{V-PDB} 值则明显低于后者.

在 δ¹⁸O_{H₂O}-δD_{V-SMOW} 图解中(图 6),I 阶段样品均落在紧靠张理刚 1983 年提出的金、铜系列岩浆水范围,指示着早阶段成矿流体以原生岩浆水为主.在 δ¹⁸O_{V-SMOW}-δ¹³C_{V-PDB} 图解中(图 7),I 阶段样品均落入沉积有机物脱羟基作用趋势线略偏下方.考

表 2 研究区石英流体包裹体碳、氢、氧同位素分析结果 (10⁻³)

Table 2 The analyzed results of carbon, hydrogen and oxygen isotopes of fluid inclusions (10⁻³)

顺序号	样品编号	单矿物类型	δ ¹³ C _{V-PDB}	δ ¹⁸ O _{V-PDB}	成矿温度(°C)	δ ¹⁸ O _{V-SMOW}	δ ¹⁸ O _{H₂O-SMOW}	δD _{V-SMOW}
1	HJ-2a	石英	-4.5	-12.6	280	17.9	9.4	-94.9
2	HJ-2b	石英	-7.6	-12.1	280	18.5	10.3	-96.3
3	HGSL-a	石英	-7.4	-13.2	280	17.3	9.1	-118.0
4	HGSL-b	石英	-4.3	-12.2	280	18.3	10.1	-102.0
5	HJ-4a	石英	-1.9	-17.5	220	12.9	-4.0	-133.5
6	HJ-4b	石英	-2.4	-17.5	220	12.9	-2.2	-138.6

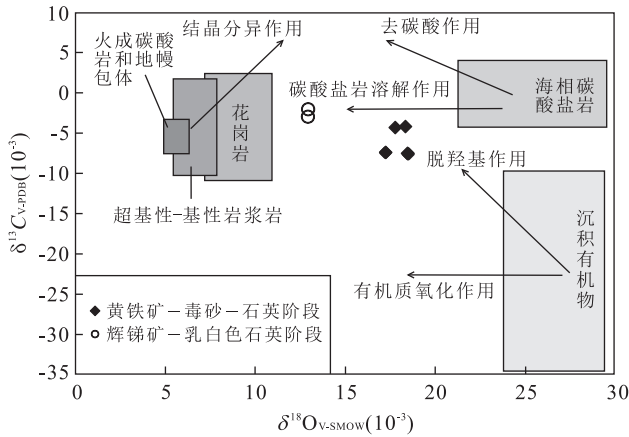


图 7 流体包裹体碳-氧同位素组成特征图解

Fig.7 The composition of carbon-oxygen isotope of fluid inclusions 底图据张瑞斌等(2003)

考虑到正常岩浆流体 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 值在 -7×10^{-3} 左右, 正常海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 值变化范围 $-5 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$ (VeizerJ and DemovicR, 1974; Schopf, 1980), 而I阶段样品 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 值介于 $-4.3 \times 10^{-3} \sim -7.6 \times 10^{-3}$ 之间, 说明岩浆热液的溶解作用促使海相碳酸盐溶解出 CO_2 的同时, 还发生了岩浆流体与溶解出的 CO_2 发生碳同位素平衡作用, 使两者碳同位素组成趋于均一化(李剑锋等, 2015). 上述分析结果表明此阶段成矿流体中的水来源于岩浆热液, 而碳则源于地层中海相碳酸盐的溶解与岩浆热液的混合作用, 也间接证实了地层对成矿作用的贡献.

在 $\delta^{18}O_{H_2O} - \delta D_{V-SMOW}$ 图解中(图 6), II 阶段样品则偏向雨水线, 说明成矿晚期有大气降水的参与. 在 $\delta^{18}O_{V-SMOW} - \delta^{13}C_{V-PDB}$ 图解上(图 7), II 阶段的两件样品落入海相碳酸盐岩溶解作用趋势线附近, 说明晚阶段的成矿流体中的碳源以海相碳酸盐岩为

主, 由于岩浆热液在此时已经不占主导地位, 故晚阶段流体的碳同位素组成更趋向于正常海相碳酸盐岩的碳同位素组成.

流体包裹体激光拉曼成分分析结果表明, I 阶段不同类型流体包裹中均含有 H_2O 、 CO_2 及少量的 CH_4 和 N_2 , II 阶段气液两相包裹体中同样含有少量的 CO_2 、 CH_4 和 N_2 成分, 证明 II 阶段同样有地层贡献; CH_4 和 N_2 的来源可能源自岩浆热液 (Chang and Meinert, 2004; Webster, 2004; 王可勇等, 2011), 也可能源自地层之中有机物与流体的水岩反应(张理刚, 1985; 郑永飞和陈江峰, 2000; 陈永清等, 2009; Deng *et al.*, 2009).

3.3 成矿流体地球化学特征

流体包裹体岩相学研究表明, 荒沟山金矿床黄铁矿-毒砂-石英矿阶段石英中主要发育含 CO_2 三相包裹体、碳质及气液两相包裹体 3 种类型. 同一成矿阶段石英中发育的不同类型包裹体均一温度接近, 含 CO_2 三相包裹体中 CO_2 含量变化较大, 为 15%~80%; 与碳质和气液两相包裹体共生, 指示着黄铁矿-毒砂-石英阶段的成矿流体为不溶解的中低温、低盐度 $NaCl-H_2O-CO_2$ 体系热液(图 8). 辉锑矿-乳白色石英阶段石英中主要发育气液两相包裹体, 包裹体气液比相近, 变化范围小, 且从早到晚呈现出盐度逐渐降低的特点, 体现了一种不断与外来天水混合的演变趋势, 表明 II 阶段成矿流体属均匀的 $NaCl-H_2O$ 体系热液(图 8). 含 CO_2 三相包裹体和碳质包裹体在此阶段并未出现, 揭示着在成矿早阶段不溶解作用已经结束.

荒沟山金矿区在元古代经历热水喷流沉积作用, 形成一套富集金元素的沉积地层(老岭群珍珠门组); 吕梁运动时期该区受到区域变质作用, 含矿建

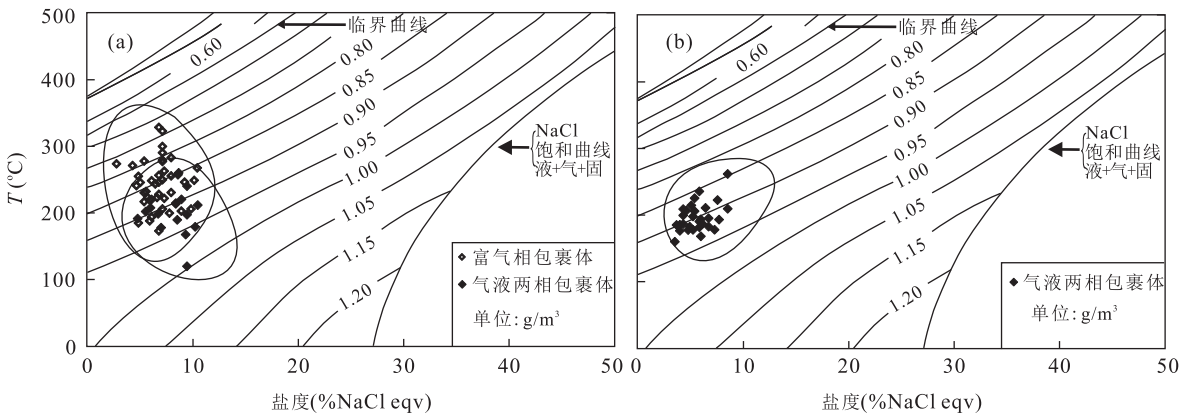


图 8 流体包裹体均一温度-盐度-密度

Fig.8 The relationship of homogenization temperature, salinity and density of fluid inclusions

造变质变形所产生的变质流体,使矿源层中的成矿物质发生活化、迁移和重新富集(杨言辰等,1999),对金起到二次富集作用。到了燕山期,随着老秃顶子岩体(178.74 ± 0.90 Ma;秦亚等,2013)侵入到地壳浅部,随着冷却结晶作用分异岩浆热液;热液通过与围岩进行复杂的水岩反应,萃取出地层中的碳和成矿物质,流体演变为中低温、低盐度富含 Au 等成矿元素的 NaCl-H₂O-CO₂ 体系热液,对金起到三次富集作用;显然,也不能排除岩浆流体本身携带 Au 等成矿物质的可能性。早期的韧性剪切带表现为构造薄弱面被后期燕山期岩浆活动所继承和发展,进而对矿床(体)有一定的控制作用。整体来看,早期的富集作用并未形成工业矿体;流体包裹体 C、H、O 同位素分析结果表明,该矿床成矿流体以岩浆热液为主;证实了燕山期的岩浆活动为该矿床形成的主要因素,即荒沟山金矿床的成矿时代为燕山期。该矿床的黄铁矿—毒砂—石英阶段成矿流体反映了混合成因成矿流体所经历的自然冷却降温、不混溶作用及矿质沉淀过程,为荒沟山矿区金矿化的主要阶段;晚期辉锑矿—乳白色石英阶段流体除继承早阶段的成矿流体外,还有大量大气降水的混入,后者甚至成为辉锑矿—乳白色石英阶段流体的主体,热液体系演化为低温、低盐度 NaCl-H₂O 型热液体系。

综上所述,荒沟山金矿床属于中温岩浆热液矿床,地层在成矿作用过程中扮演重要角色,即提供了碳源与成矿物质。

4 结论

(1) 按矿物组合差异及矿脉之间的穿切关系,可将荒沟山金矿热液成矿作用划分为 I 黄铁矿—毒砂—石英阶段和 II 晚期辉锑矿—乳白色石英阶段。

(2) 荒沟山金矿床黄铁矿—毒砂—石英阶段成矿流体属不混溶的中低温、低盐度 NaCl-H₂O-CO₂ 体系热液;辉锑矿—乳白色石英阶段成矿流体属低温、低盐度 NaCl-H₂O 型热液体系。

(3) 碳、氢、氧同位素研究表明, I 阶段成矿流体主要来源于岩浆热液, II 阶段流体除继承早阶段的热液外,还有大气降水的混入; δD 和 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 值分析结果证明两个成矿阶段流体均与地层发生过较强的水岩反应。

References

Barrett, T. J., Jarvis, I., Jarvis, K. E., 1990. Rare Earth Element

- Geochemistry of Massive Sulfides-Sulfates and Gossans on the Southern Explorer Ridge. *Geology*, 18(7): 583. doi: 10.1130/0091-7613(1990)018<0583: reegom>2.3.co;2
- Brown, P. E., Hagemann, S. G., 1995. MacFlincor and Its Application to Fluids in Archean Lode-Gold Deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(19): 3943—3952. doi: 10.1016/0016-7037(95)00254-W
- Chang, Z. S., Meinert, L. D., 2004. The Magmatic-Hydrothermal Transition: Evidence from Quartz Phenocryst Textures and Endoskarn Abundance in Cu-Zn Skarns at the Empire Mine, Idaho, USA. *Chemical Geology*, 210: 149—171. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.018
- Cheng, Y. Q., Huang, J. N., Lu, Y. X., et al., 2009. Geochemistry of Elements, Sulphur-Lead Isotopes and Fluid Inclusions from Jinla Pb-Zn-Ag Poly-Metallic Ore Field at the Joint Area across China and Myanmar Border. *Earth Science*, 34(4): 585—594.
- Clayton, R. N., O'Neil, J. R., Mayeda, T. K., 1972. Oxygen Isotope Exchange between Quartz and Water. *Geophys. Res.*, 77: 3057—3067. doi: 10.1029/JB077i017p03057
- Deng, J., Yang, L. Q., Gao, B. F., et al., 2009. Fluid Evolution and Metallogenic Dynamics during Tectonic Regime Transition: Example from the Jiapigou Gold Belt in Northeast China. *Resource Geology*, 59(2): 140—152. doi: 10.1111/j.1751-3928.2009.00086.x
- Li, J. F., Wang, K. Y., Lu, J. S., et al., 2015. Ore-Forming Fluid Geochemical Characteristics and Genesis of Pb-Zn Deposit in Hongling Inner Mongolia. *Earth Science*, 40(6): 995—1005. doi: 10.3799/dqkx.2015.083
- Li, X. W., Wang, K. Y., Qian, Y., et al., 2013. The Geochemical Characteristics of Ore-Forming Fluids of Daheishan Molybdenum Deposit and Its Geological Significance, Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3173—3181 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. Z., Fan, H. R., Ni, P., et al., 2004. Fluid Inclusion. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Qin, Y., Liang, Y. H., Hu, Z. C., et al., 2013. Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Jurassic Granitoid in Huanggoushan Area South of Jilin in China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Editing)*, 40(1): 97—105 (in Chinese with English abstract).
- Schopf, T. J. M., 1980. Paleooceanography. Harvard University Press, Cambridge.
- Shao, J. B., Fan, J. Z., 2004. Aeromagnetic Research of Laoling Mineralization Belt. *Progress in Geophysics*, 19(2): 449—454 (in Chinese with English abstract).
- Veizer, J., Demovic, R., 1974. Strontium as a Tool for Facies Analy-

- sis. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44: 93–115. doi: 10.1306/74D72991-2B21-11D7-8648000102C1865D
- Wang, K. Y., Qing, M., Bian, H. Y., et al., 2010. The Geological Features and Geochemistry of Ore-Forming Fluids of Wulong Gold Deposit in Liaoning Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(3): 557–564 (in Chinese with English abstract).
- Wang, K. Y., Qing, M., Zhang, X. N., et al., 2011. Study on the Characteristics of Fluid Inclusions and Metallogenic Evolution of Jinchang Gold Deposit, Heilongjiang Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1275–1286 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. W., 1993. A Preliminary Study on the Karat Origin of the Huanggoushan Gold Deposit, Jilin Province. *Jilin Geology*, 12(4): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Webster, J. D., 2004. The Exsolution of Magmatic Hydrosaline Chloride Liquids. *Chemical Geology*, 210: 33–48. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.003
- Wei, X. L., Ma, Y. S., Cang, S. N., et al., 2010. The Geological Features and Its Origin of the Huanggoushan Gold Deposit, Jilin Province. *Qinghai Science and Technology*, 16(2): 38–41 (in Chinese).
- Xing, S. W., Ma, Y. B., Zhang, X. H., et al., 2010. Protolith Recovering and Paleosedimentary Environment of Laoling Group in Southern Jilin Province. *Geology and Resources*, 19(4): 271–279 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. C., Ye, S. Q., Feng, B. Z., 1999. The Huanggoushan Typed Hotwater Deposition and Superimposed Reformation Gold Deposit in Laoling Mineralization Belt of South Jilin Province. *Gold*, 20(6): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. C., Ma, Z. H., Yang, B. J., 2002. Research on the Metallogenic Series of the Paleo-Proterozoic Metallogenic Belt in North China. Jilin People's Publishing House, Changchun (in Chinese).
- Zhang, L. G., 1985. The Application of the Stable Isotope to Geology. Shanxi Science and Technology Press, Xi'an, 91–94 (in Chinese).
- Zhang, R. B., Liu, J. M., Ye, J., 2003. C&O Isotopic Geochemistry of Shouwangfen Copper Deposit, Hebei Province. *Mineral Resources and Geology*, 17(2): 122–126 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. M., Wang, K. Y., Cao, X. L., et al., 1993. A Study on the Geologic Features and Geochemistry of the Huanggoushan and Nancha Gold Deposit, Western Jilin Province. *Jilin Geology*, 12(2): 57–65 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, C. J., 1995. The Geological Features and its Origin of the Huanggoushan Gold Deposit, Jilin Province. *Jilin Geology*, 14(3): 1–16 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., Chen, J. F., 2000. Stable Isotope Geochemistry Science Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈永清, 黄静宁, 卢映祥, 等, 2009. 中缅毗邻区金腊 Pb-Zn-Ag 多金属矿田元素、稳定同位素和流体包裹体地球化学. *地球科学*, 34(4): 585–594.
- 李剑锋, 王可勇, 陆继胜, 等, 2015. 内蒙古红岭铅锌矿床成矿流体地球化学特征及矿床成因. *地球科学*, 40(6): 995–1005.
- 李向文, 王可勇, 钱焯, 等, 2013. 吉林大黑山钼矿床成矿流体地球化学特征及其地质意义. *岩石学报*, 29(9): 3173–3181.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等, 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社.
- 秦亚, 梁一鸿, 胡兆初, 等, 2013. 吉林南部荒沟山地区侏罗纪花岗岩地球化学特征及构造意义. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 40(1): 97–105.
- 邵建波, 范继璋, 2004. 老岭成矿带航磁地质研究. *地球物理学进展*, 19(2): 449–454.
- 王可勇, 卿敏, 边红业, 等, 2010. 辽宁五龙金矿床地质特征及成矿流体地球化学性质. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(3): 557–564.
- 王可勇, 卿敏, 张新娜, 等, 2011. 黑龙江金厂金矿床流体包裹体特征及成矿作用研究. *岩石学报*, 27(5): 1275–1286.
- 王有维, 1993. 吉林荒沟山金矿床岩溶成因探讨. *吉林地质*, 12(4): 1–15.
- 魏小林, 马永胜, 仓索南尖措, 等, 2010. 吉林荒沟山金矿特征及成因探讨. *青海科技*, 16(2): 38–41.
- 邢树文, 马玉波, 张学海, 等, 2010. 吉林南部老岭群的原岩恢复和古沉积环境. *地质与资源*, 19(4): 271–279.
- 杨言辰, 马志红, 杨宝俊, 2002. 中国北方古元古代成矿带矿床成矿系列研究. 长春: 吉林人民出版社.
- 杨言辰, 叶松青, 冯本智, 1999. 吉南老岭荒沟山式热水沉积叠加改造型金矿床. *黄金*, 20(6): 1–4.
- 张理刚, 1985. 稳定同位素在地质科学中的应用. 西安: 陕西科学技术出版社, 91–94.
- 张瑞斌, 刘建明, 叶杰, 2003. 河北寿王坟铜矿碳-氧同位素地球化学特征及其意义. *矿产与地质*, 17(2): 122–126.
- 赵彦明, 王魁元, 曹秀兰, 等, 1993. 吉林南部荒沟山-南岔金矿的地质特征和地球化学研究. *吉林地质*, 12(2): 57–65.
- 郑传久, 1995. 吉林省荒沟山金矿床地质特征及成因. *吉林地质*, 14(3): 1–16.
- 郑永飞, 陈江峰, 2000. 稳定同位素地球化学. 北京: 科学出版社.