

河南冷水北沟铅锌银矿床流体包裹体研究及矿床成因*

祁进平^{1,2} 陈衍景^{1,2**} 倪培³ 赖勇² 丁俊英³ 宋要武⁴ 唐国军²

QI JinPing¹, CHEN YanJing^{1,2**}, NI Pei³, LAI Yong², DING JunYing³, Song YaoWu⁴ and TANG GuoJun²

1. 中国科学院广州地球化学研究所成矿动力学重点实验室, 广州 510640

2. 北京大学造山带与地壳演化实验室, 北京 100871

3. 南京大学内生矿床国家重点实验室, 南京 210093

4. 河南省地质调查院, 郑州 450007

1. Key Laboratory of Metallogenic Dynamics, Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China

2. Laboratory of Orogen and Crust Evolution, Peking University, Beijing 100871, China

3. State key laboratory for mineral deposit research, Nanjing University, Nanjing 210093, China

4. Henan Bureau of Geological Survey, Zhengzhou 450007, China

2007-02-30 收稿, 2007-05-08 改回.

Qi JP, Chen YJ, Ni P, Lai Y, Ding JY, Song YW and Tang GJ. 2007. Fluid inclusion constraints on the origin of the Lengshuibegou Pb-Zn-Ag deposit, Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9):2119–2130

Abstract The Lengshuibegou Pb-Zn-Ag deposit in Henan province is located to the north of the Luanchuan fault along the southern margin of North China craton. The deposit is a fault-controlled vein-type deposit, hosted by Meso-Neoproterozoic strata. The ores consist of sulfides and a small amount of quartz and carbonates. Ore-forming process includes four stages marked by four kinds of parageneses: quartz-pyrite stage (I) pyrite-sphalerite stage (II), polymetallic sulfide stage (III), and carbonate stage (IV). Microthermometric data of fluid inclusions indicate that ore-forming fluids are $\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ system, characterized by low salinities of 0.22 ~ 13.8 wt% NaCl eqv. From early to late the homogeneous temperatures of fluid inclusions decrease from 420°C ~ 340°C (stage I), through 370°C ~ 280°C (stage II), to 320°C ~ 260°C (III), and to <260°C (stage IV). The salinities of stages I and II fluids are lower than 8wt% NaCl eqv. The salinities of stage III fluids are up to 13.8wt% NaCl eqv, and with daughter crystals can be occasionally observed. Fluid inclusions of both stages I and II yield two group of homogeneous pressures, i. e. 70 ~ 80MPa and 180 ~ 200MPa, which can be interpreted to represent alternating between hydrostatic and lithostatic fluid-systems at the depth of ca. 8 km, possibly related to fault-valve activities. The fluid inclusions of stage III yield only one group of 70 ~ 80MPa, suggesting an open-space filling hydrostatic fluid-system. The characteristic of alternating lithostatic and hydrostatic pressures during stages I and II is extremely analogous to the fault-valve model. Pulsative fluid boiling of CH_4 -bearing CO_2 -rich fluids gradually release heat and increase the salinities of the fluid system. This is strongly supported by the observations of boiling fluid inclusions in stage II minerals, and by the regularly evolved compositional types of fluid inclusions, mineralogical parageneses and ore fabrics. All the above suggest that the Lengshuibegou deposit is a typical case of orogenic-type Pb-Zn-Ag lodes formed during transition from collisional compression to extension and can be genetically addressed using the tectonic model for collisional orogeny, metallogeny and fluid flow (CMF model).

Key words Lengshuibegou Pb-Zn-Ag deposit, Fluid inclusion, Ore-forming fluid, Orogenic Pb-Zn-Ag deposit, Qinling Orogen

摘要 河南栾川冷水北沟铅锌银矿床位于华北克拉通南界栾川断裂北侧。矿床赋存于中-晚元古代浅变质碎屑岩建造中,受断裂控制,矿体呈脉状;矿石主要由金属硫化物,少量石英和碳酸盐组成;围岩蚀变和成矿过程分为4个阶段,以石英-

* 国家973项目2006CB4035008和2006CB403504课题,自然科学基金项目(编号40425006和40352003),以及中国博士后科学基金(编号20060400768)资助。

第一作者简介:祁进平,男,1976年生,博士后,矿床学专业, E-mail: pingjinqi@sina.com

** 通讯作者:陈衍景, E-mail: yjchen@pku.edu.cn; gijyichen@126.com

黄铁矿组合(I阶段)、黄铁矿-闪锌矿组合(II阶段)、多金属硫化物(III阶段)和碳酸盐(IV阶段)为标志。包裹体研究表明,成矿流体为含CH₄的碳水体系,盐度为0.22~13.8 wt% NaCl eqv.。从早到晚,流体包裹体均一温度为420℃~340℃(I)、370℃~280℃(II)、320℃~260℃(III)和<260℃(IV)。I、II阶段的流体盐度低于8 wt% NaCl eqv., III阶段增高至13.8 wt% NaCl eqv.,甚至偶见子晶。I、II阶段的流体包裹体均一压力分为两组,即180~200MPa和70~80MPa,代表着深约8km的静水与静岩压力系统的共存或交替; III阶段只有70~80MPa一组压力,指示开放环境注入的静水压力体系。I、II阶段静岩与静水压力系统的交替现象完全吻合于断层阀模式,含CH₄的CO₂-H₂O流体的脉动沸腾消耗了流体成矿系统热能,并使盐度不断增高、成矿。该认识可被II阶段广泛存在的沸腾流体包裹体组合证明,也与流体包裹体成分类型、矿物共生组合特征、矿石组构的规律演化相一致。以上表明,冷水北沟是一个典型的形成于碰撞造山挤压向伸展转变期的造山型Pb-Zn-Ag矿床实例,成矿机理可由碰撞造山成岩成矿与流体作用模型(即CMF模式)所解释。

关键词 冷水北沟铅锌银矿床; 流体包裹体; 成矿流体; 造山型铅锌银矿床; 秦岭造山带

中图法分类号 P618.4; P618.52

在矿床勘查领域,SEDEX和MVT型铅锌矿床以其巨大的规模和稳定的层位而成为地质勘查的主要追逐目标; 相反,薄脉状的矿体因其储量规模小、矿体产状变化复杂、开采难度大而被忽视。然而,河南洛宁县铁炉坪脉状银铅锌矿床(陈衍景等,2003; Chen *et al.*, 2004,2005)和内乡县银洞沟银铅锌金矿床(张静等,2004,2005; Zhang and Chen, 2005)两个大型矿床的发现、勘查和研究已经突破了这种传统观点,拓宽了找矿思路。最近,河南地调院在河南卢氏-栾川地区又发现了 2.1×10^6 t冷水北沟、百炉沟和银洞沟等一批薄脉状铅锌银矿床,预测铅锌资源量达 20×10^6 t,银资源量19000t。这再次证明薄脉状铅锌银矿床不仅可以达到大型规模,而且可达超大型规模。这促使我们必须加强脉状矿床的地质地球化学研究,揭示脉状矿床的成矿机制,建立相关的成矿理论和找矿模型,有效地为矿产资源勘查提供科学理论与技术支撑。

自2001年以来,跟踪栾川地区冷水北沟等脉状铅锌银矿床的地质勘查,我们研究了赋矿地层的元素和同位素地球化学组成(祁进平等,2005)、矿床地质地球化学特征和成矿规律,认为该矿床在诸多方面与造山型金、银矿床特征一致,似为造山型(陈衍景,2006); 但这种认识还需要流体包裹体证据进一步确认,因为流体包裹体特征被视为判定造山型矿床的重要标志之一(Groves *et al.*, 1998,2003; Kerrich *et al.*, 2000; Mernagh *et al.*, 2007)。因此本文报道了冷水北沟铅锌银矿床的流体包裹体研究结果,并据此探讨矿床成因。

1 地质背景

冷水北沟铅锌银矿床所在栾川铅锌银矿区位于华北克拉通南缘华熊地块南部,马超营断裂和栾川断裂之间(图1A)的印支期-燕山期洛南-栾川推覆构造带(张国伟等,2001)。矿床的石英锆铀坪年龄为 137.87 ± 0.39 Ma(燕长海,2004),形成于燕山期。

矿区由北向南依次发育官道口群、栾川群和陶湾群(图1B)。官道口群由滨-浅海相碎屑岩、碳酸盐岩组成,低级变质达绿片岩相,沉积于1.4~1.0Ga(河南省地质矿产

局,1989; 胡受奚等,1988; 陈衍景和富士谷,1992)。栾川群整合或局部平行不整合于官道口群之上,为一套浅海陆缘碎屑岩-碳酸盐岩建造,由下而上分为白术沟组、三川组、南泥湖组、煤窑沟组,同位素年龄在1.0~0.8Ga(胡受奚等,1988)。陶湾群为一套碎屑岩-碳酸盐沉积建造。

矿区主构造线为NW向,包括一系列向南逆冲的推覆断层,一系列轴面向北陡倾的倒转褶皱(燕长海,2004)(图1B)。褶皱构造由北向南主要有杨树凹-白沙洞向斜、银和沟背斜、增河口向斜、黄背岭-石宝沟背斜、核桃岔向斜等(叶会寿等,2006)。NW向断裂带规模大,在走向和倾向上呈舒缓波状,断裂带一般宽20~40m,最宽>100m(燕长海,2004)。断裂带内可见不同时期的变辉长岩、正长斑岩和花岗斑岩侵入体,显示断裂活动的多期性(燕长海,2004)。NNE-NE向断裂局部发育,常叠加于NW向构造之上。冷水北沟矿床即赋存于NNE-NE向断裂构造中。

区内发育上房沟和南泥湖等燕山期浅成斑状花岗岩体,单个岩体面积通常<1km²,主要为斑状花岗岩、斑状黑云母花岗闪长岩(胡受奚等,1988; 徐兆文等,2000),多伴随斑岩-夕卡岩型钼矿床或矿化,被划归同熔型或I型,成岩机制与A型俯冲有关(胡受奚等,1988; 李泽九和骆庭川,1994; 陈岳龙和张本仁,1994)。但Chen *et al.* (2000)发现东秦岭地区燕山期浅成斑岩和深成花岗岩的锶、氧同位素具有一致性,结合岩石化学和地球物理资料,认为这些浅成中酸性小岩体属陆壳重熔的产物,中生代的A型俯冲导致了岩浆发育。

2 矿床地质

冷水北沟矿区面积99km²,包括冷水北沟、杨树凹、白沙洞和银和沟矿段(床),发育12条矿带,已圈定16条矿体,获(111b)+(332)+(333)+(3341)资源量:铅+锌资318.04万t,银2889.39t(河南省地质调查院,2006)。本文研究的冷水北沟矿床位于河南栾川县南泥湖钼矿田西北侧(图1B,图2),赋矿地层为栾川群南泥湖组中段和白术沟组上段地层,前者岩性为绢云钙质片岩夹薄层大理岩,后者为黑色板状炭质千枚岩、薄层炭质绢云石英片岩夹含炭大理岩。主要

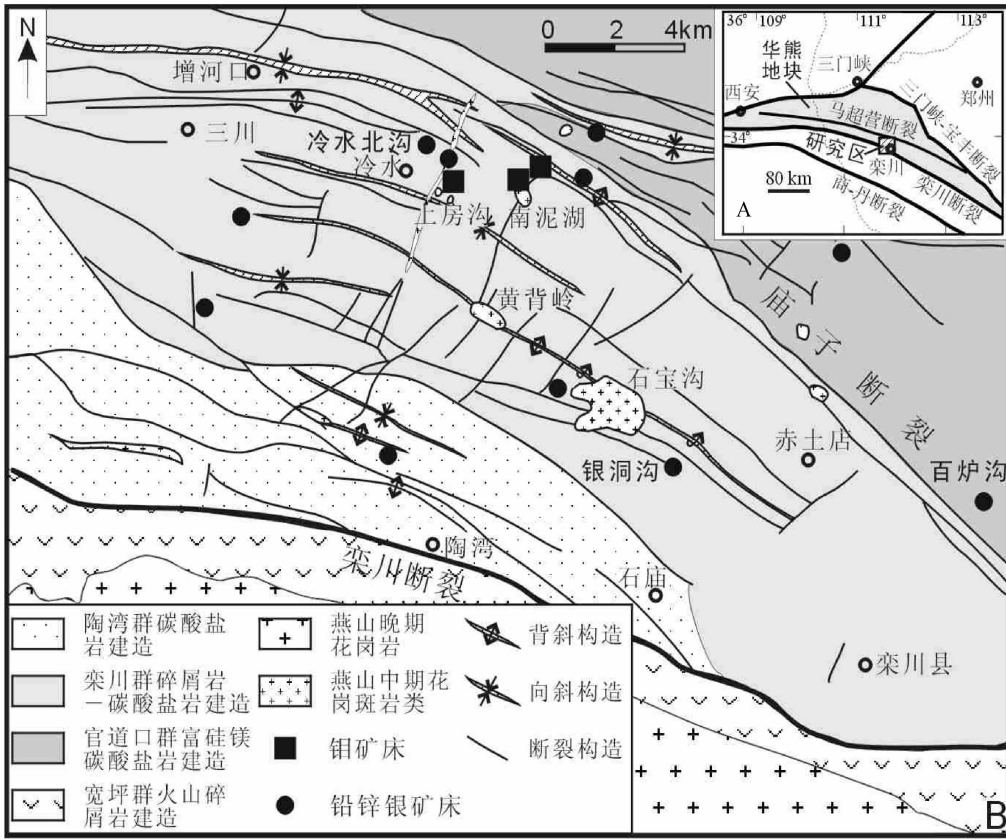


图1 栾川铅锌银矿区构造地质简图(据燕长海,2004;叶会寿等,2006;综合修改)

Fig.1 Simplified geologic map of Pb-Zn-Ag ore filed in Luanchuan area (modified after Yan *et al.*, 2004 and Ye *et al.*, 2006)

矿脉呈北东走向,南东倾,倾角较陡(50~78°)。已圈定S027、和S031和S032等7条矿脉,资源量:铅+锌273.72万t,银2341.84t(河南省地质调查院,2006);矿体呈脉状或透镜状,表1列出了主要矿体的基本特征。

表1 冷水北沟矿床主要矿体特征(据河南省地质调查院,2006)

Table 1 Features of primary orebodies in the Lengshuibeiou deposit

矿体	长 (m)	厚 (m)	最大斜 深(m)	产状 (°)	Pb (%)	Zn (%)	Ag ×10 ⁻⁶
S027-I	2234	1.37	600	145 ± ∠55~63	10.85	7.47	201.82
S031-I	1936	1.82	410	110~130∠58~75	1.82	8.83	43.71
S032-I	1865	1.52	505	110~135∠50~78	3.54	4.32	79.93

原生矿石可分为块状多金属硫化物-石英脉型和蚀变角砾岩型两种。S027号脉的矿石矿物主要是黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂和少量黄铜矿,银矿物主要为自然银(叶会寿等,2006);脉石矿物主要为石英、方解石、绢云母等,但石英含量较少,各成矿阶段均有发育。S031、S041号矿脉矿物组合与S027脉大致相同,但磁黄铁矿含量较高。

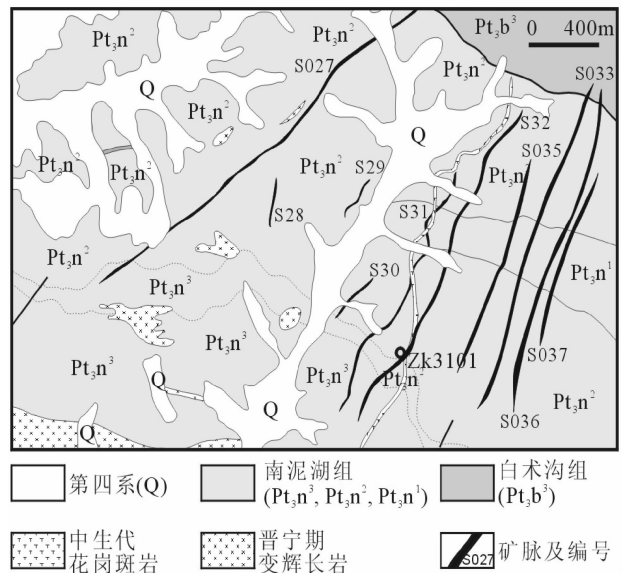


图2 栾川冷水北沟矿区地质图(据燕长海,2004)

Fig.2 Geologic map of the Lengshuibeiou Pb-Zn-Ag deposit in Luanchuan

矿石构造包括块状、团块状、条带状、脉状、网脉状、角砾-次角砾状、浸染状构造以及晶洞或晶簇构造。矿石结构主要为粒状结构、固溶体分离结构、压碎结构、交代残余结构、包含或嵌晶结构等。

近矿围岩蚀变主要有硅化、绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿-黄铜矿及泥化。根据矿脉穿插关系、矿物组合、矿石组构等,将成矿过程分为4个阶段(图3): (1)黄铁矿-石英阶段(I阶段),矿物组合为石英+黄铁矿;(2)黄铁矿-闪锌矿阶段(II阶段),矿物以闪锌矿和黄铁矿为主,伴有石英、毒砂、黄铜矿等;(3)多金属硫化物阶段(III阶段),主要矿物为方铅矿和黄铁矿,次为闪锌矿、毒砂、黄铜矿和少量石英;(4)碳酸盐阶段(IV阶段),主要矿物为方解石、石英和黄铁矿。其中II和III阶段是主要的矿化阶段,而I和IV阶段的铅、锌、银矿化较弱。II和III阶段矿物组合有别,但无明显的穿插关系,也可并为一个阶段。

矿物	黄铁矿-石英阶段	黄铁矿-闪锌矿阶段	多金属硫化物阶段	碳酸盐阶段
黄铁矿	■	■	■	■
石英	■	■	■	■
闪锌矿		■	■	■
毒砂		■	■	■
黄铜矿		■	■	■
方铅矿		■	■	■
自然银		■	■	■
菱铁矿		■	■	■
方解石			■	■
绢云母		■	■	■

图3 冷水北沟热液矿物共生组合及生成顺序

Fig. 3 Paragenetic assemblage and sequence of hydrothermal minerals in the Lengshuibeiou deposit

表2 冷水北沟铅锌银矿床显微测温结果(°C)

Table 2 Microthermometric data(°C) of the Lengshuibeiou Pb-Zn-Ag deposit

阶段	包裹体类型	T_{mCO_2}	T_{mela}	T_{hCO_2}	T_{mice}	T_{hot}
I	CO ₂ -H ₂ O型	-66.0 ~ -65.8	7.6 ~ 8.9	28.0 ~ 31.1 (V少数L)		340 ~ 407 (L), 400 ~ 425 (临界)
	水溶液型				-4.1 ~ -3.4	300 ~ 394 (L)
II	CO ₂ -H ₂ O型	-64.3 ~ -62.8	7.1 ~ 9.9	17.6 ~ 24.7(L), 29 ~ 29.6(V)		311 ~ 329(L), 348 ~ 367 (V或L)
	水溶液型				-5.3 ~ -2.7	210 ~ 380 (L少数V)
III	CO ₂ -H ₂ O型	-56.7	7.0	30.4 (V)		300 (320爆裂)
	水溶液型 含子晶型				-9.9 ~ -5.5	209 ~ 313 (L)
IV	水溶液型					150 ~ 190 (L)

注: T_{mCO_2} 为CO₂融化温度; T_{mela} 为笼合物融化温度; T_{hCO_2} 为CO₂均一温度; T_{mice} ,冰点; T_{hot} 为完全均一温度
括号中的V和L分别代表气体和液体。

3 流体包裹体研究

3.1 分析方法与样品特征

流体包裹体显微热力学研究在南京大学内生矿床国家重点实验室的流体包裹体实验室完成,使用仪器为 Linkam THMS 600 型冷热台,温度范围是 -196°C ~ +600°C,以美国 FLUID INC 公司的合成流体包裹体标准样品标定冷热台温度。测试精度:小于0°C时为 ±0.1°C,0 ~ 30°C时为 ±0.5°C,大于30°C时为 ±1°C。测温过程中的升温速率为 0.2°C/min,相转变温度附近的升温速率降低为 0.2°C/min。石英包裹体原位激光拉曼光谱分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成,使用 Renishaw RW-1000 型激光拉曼光谱仪,采用 514.5nm 的 Ar 原子激光束。CO₂-H₂O 型包裹体盐度根据所测含碳相笼合物融化温度,利用 Collins (1979) 提供的方法获得;水溶液包裹体盐度根据所测的冰点温度,利用 Bodnar (1993) 提供的方程计算得到。

包裹体研究样品主要采自 S027 脉,仅碳酸盐阶段的样品采自 S031 脉。包裹体研究工作主要针对脉状穿插关系明显的石英样品(图4A),以保证包裹体寄主矿物能够代表不同成矿阶段;考虑到石英中流体包裹体与成矿关系的不确定性(Wilkinson, 2001),还研究了矿石矿物闪锌矿的包裹体。石英和闪锌矿中的流体包裹体大多为原生和假次生包裹体,呈随机、带状或线状分布,包裹体多呈不规则状或负晶形,长径一般3~20μm,最大可达42.5μm(图4I)。根据流体包裹体的显微镜下特征和冷热台下相变行为,将包裹体分为 CO₂-H₂O 型包裹体、水溶液包裹体和含子晶包裹体。

3.2 流体包裹体的均一温度和盐度

各阶段测温结果列于表2,现分述如下:

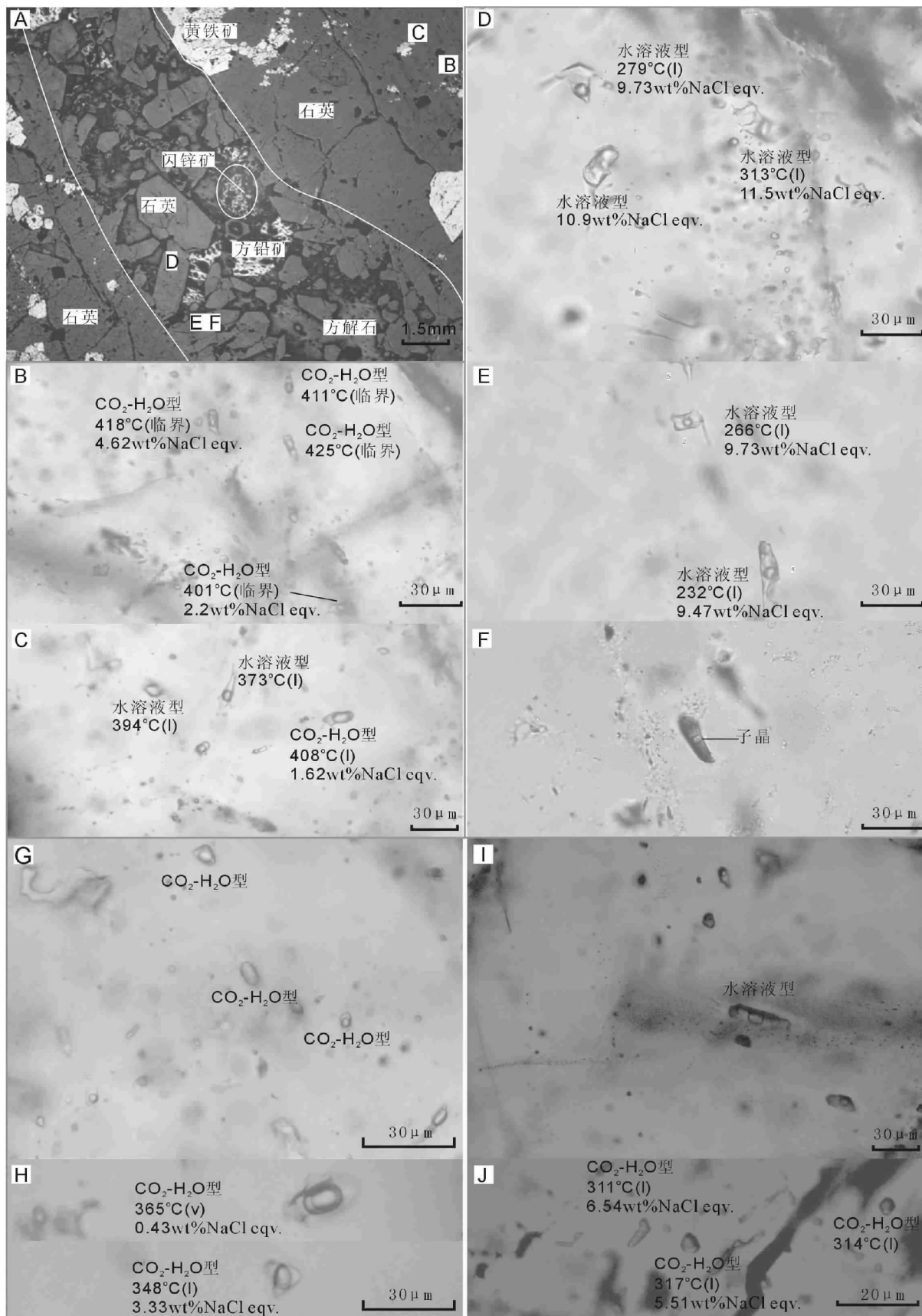


图4 冷水北沟铅锌银矿 I, II 和 III 阶段流体包裹体及测温数据

图 A 示闪锌矿 + 方铅矿 + 石英组合(III 阶段)沿黄铁矿 + 石英组合(I 阶段)的裂隙充填; 图 B 和 C 示 I 阶段石英中 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型和水溶液型包裹体共存,“临界”指均一方式为临界均一; 图 D 示 III 阶段石英中随机分布的水溶液包裹体; 图 E 示 III 阶段石英中线状分布的水溶液型包裹体; 图 F 示 III 阶段石英中的含子晶包裹体; 图 G 和 H 分别示 II 阶段石英中充填度变化较大的沸腾包裹体群和异相均一的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体; 图 I 和 J 分别示 II 阶段闪锌矿中水溶液型包裹体和 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体

Fig. 4 Fluid inclusions and related microthermometric data of stage I, II and III of the Lengshuibei deposit

Figure A shows that sphalerite + galena + quartz assemblage (III stage) fills the fissure in pyrite + quartz assemblage (I stage); figure B and C show $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ inclusions and aqueous inclusions in stage I quartz; figure D shows random distribution inclusions in stage III quartz; figure E shows linear distribution aqueous inclusions; figure F shows halite-bearing inclusion in stage III quartz; figure G and H show various filling degree of boiling fluid inclusions and $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ fluid inclusions with different homogenization phases in stage II quartz; figure I and J show aqueous inclusions and $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ inclusions in stage II sphalerite, respectively

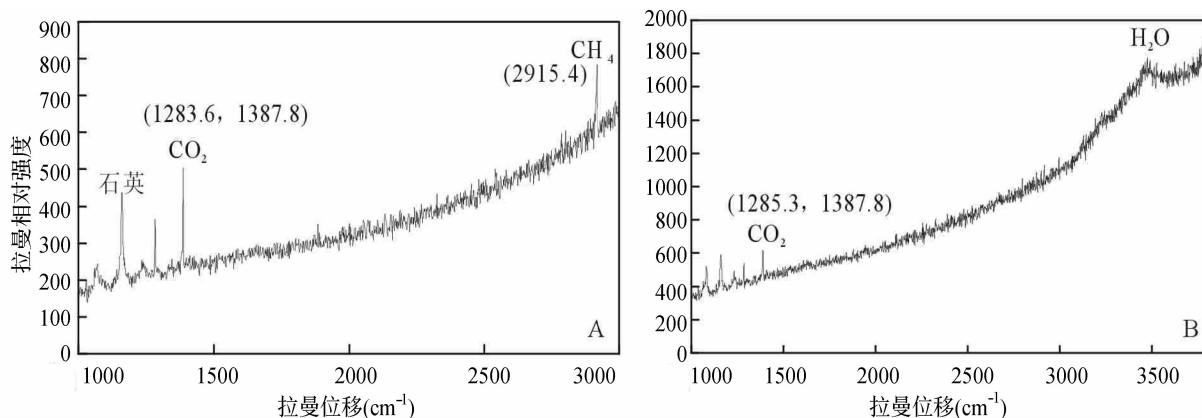


图 5 冷水北沟成矿 I 阶段(A)和 II 阶段(B)石英中包裹体气相拉曼光谱分析

Fig. 5 Laser-Raman analysis on gas phase of inclusions in quartz of stages I (A) and II (B)

在 I 阶段,包裹体以 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型和水溶液型为主。其中, $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体在室温下可见明显的三相,即 $\text{CO}_2(\text{V}) + \text{CO}_2(\text{L}) + \text{H}_2\text{O}(\text{L})$ 。然而,当 $\text{CO}_2(\text{V})$ 比例较高时,只在降温过程中才出现 CO_2 两相。冷冻至液相全冻后,回温过程中固相 CO_2 的熔化温度为 $-66.0^\circ\text{C} \sim -65.8^\circ\text{C}$, 低于纯 CO_2 三相点温度 (-56.6°C), 表明 CO_2 相中混有其它气体,激光拉曼光谱分析显示主要为 CH_4 (见后,图 5A)。进一步回温时, CO_2 笼合物在 $7.6^\circ\text{C} \sim 8.9^\circ\text{C}$ 融化, CO_2 相在 $28^\circ\text{C} \sim 31.1^\circ\text{C}$ 均一至气相。包裹体临界均一或向液相均一,前者均一温度为 $425^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$, 后者为 $408^\circ\text{C} \sim 340^\circ\text{C}$ (图 4B, C)。根据上述温度,求得水溶液相的盐度为 $0.22 \sim 6.59 \text{ wt\% NaCl eqv.}$ 。水溶液包裹体在降温至 $-26^\circ\text{C} \sim -29^\circ\text{C}$ 时液相全部冷冻,回温过程测得冰点温度为 $-4.1^\circ\text{C} \sim -3.4^\circ\text{C}$, 对应的盐度为 $5.56 \sim 6.59 \text{ wt\% NaCl eqv.}$; 包裹体向液相均一,均一温度约 $300^\circ\text{C} \sim 394^\circ\text{C}$ 。

在 II 阶段,即黄铁矿-闪锌矿阶段,常见 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型和水溶液型包裹体(图 4G, H, I, J)。 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体在室温下可见 $\text{CO}_2(\text{V}) + \text{CO}_2(\text{L}) + \text{H}_2\text{O}(\text{L})$ 三相或 $\text{CO}_2(\text{L}) + \text{H}_2\text{O}(\text{L})$ 两相。降温至约 $-95^\circ\text{C} \sim -87^\circ\text{C}$ 时,出现 CO_2 固相。回温过程中,固相 CO_2 熔化温度约为 $-64.3^\circ\text{C} \sim -62.6^\circ\text{C}$, 低于 CO_2 三相点温度 (-56.6°C), 表明 CO_2 相中混有其它气体,激光拉曼光谱分析显示主要为 CH_4 ; CO_2 笼合物在 $7.1^\circ\text{C} \sim 9.9^\circ\text{C}$ 融化,求得水溶液相的盐度为 $0.22 \sim 3.33 \text{ wt\%}$

NaCl eqv. , 表明盐度较低。继续升温, CO_2 相均一过程出现两种情况: (1) 在 $17.6^\circ\text{C} \sim 24.7^\circ\text{C}$ 时 CO_2 均一至液相,在 $311^\circ\text{C} \sim 329^\circ\text{C}$ 时包裹体完全均一至液相,主要见于闪锌矿样品中; (2) 在 $29.0^\circ\text{C} \sim 29.6^\circ\text{C}$ 时 CO_2 部分均一至气相,包裹体的少数在 $320^\circ\text{C} \sim 330^\circ\text{C}$, 多数在 $345^\circ\text{C} \sim 348^\circ\text{C}$ 完全均一至气相,或在 $365^\circ\text{C} \sim 367^\circ\text{C}$ 完全均一至液相。可见,在 $>345^\circ\text{C}$ 和 $320^\circ\text{C} \sim 330^\circ\text{C}$ 两个温度区间,均存在包裹体异相均一现象,应指示流体沸腾现象(图 4G, H)。水溶液包裹体在室温下可见气液两相,气液比较高 ($40\% \sim 70\%$), 均一温度在 $210^\circ\text{C} \sim 380^\circ\text{C}$; 盐度为 $4.96 \sim 5.86 \text{ wt\% NaCl eqv.}$, 高于 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体的盐度。拉曼光谱测试表明,水溶液包裹体的气泡中含有 CO_2 (图 5B)。在 II 阶段石英中,常见沿愈合裂隙分布的假次生包裹体,其均一温度与原生包裹体相差不大,如一组沿愈合裂隙呈线性分布的假次生水溶液包裹体的均一温度为 $337^\circ\text{C} \sim 339^\circ\text{C}$, 而旁边随机分布的原生水溶液包裹体的均一温度为 $320^\circ\text{C} \sim 324^\circ\text{C}$ (图 6A)。沿同一愈合裂隙或愈合共轭裂隙分布的假次生水溶液包裹体,通常具有极为一致的均一温度,变化范围小于 2°C (图 6B, A)。

II 阶段闪锌矿中 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体均一温度为 $310^\circ\text{C} \sim 330^\circ\text{C}$, 但由于根据这组包裹体所的压力较高,考虑到温度的压力校正问题,这组包裹体的实际捕获温度应该高于这个温度范围。

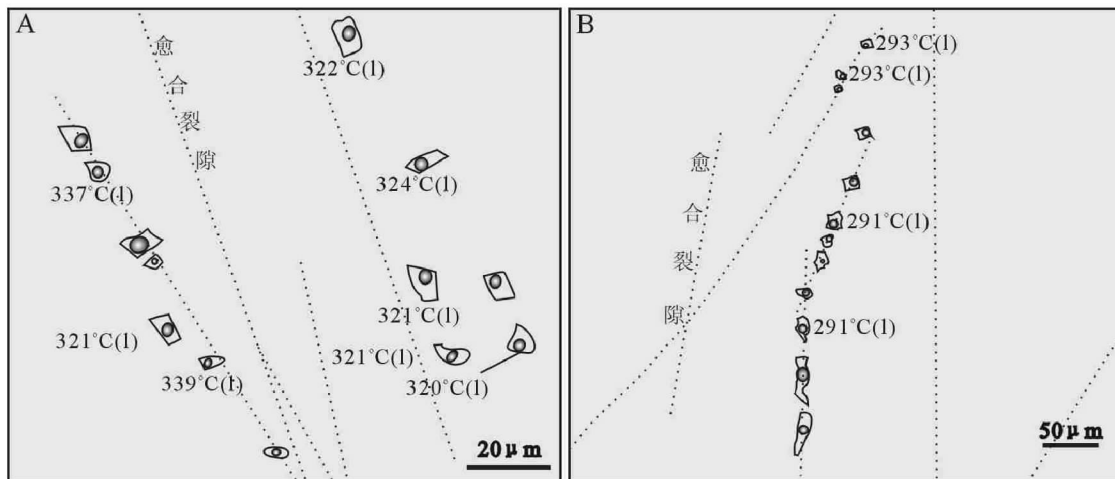


图6 冷水北沟 II 阶段石英中原生和假次生水溶液包裹体

A-沿愈合裂隙分布的假次生包裹体；B-沿一组共轭愈合裂隙分布的假次生包裹体

Fig. 6 Primary and Pseudo-secondary aqueous inclusions in stage II quartz from the Lengshuibeiyou deposit. A-Pseudo-secondary inclusions along healed fissures. B-Pseudo-secondary inclusions in conjugate fissures

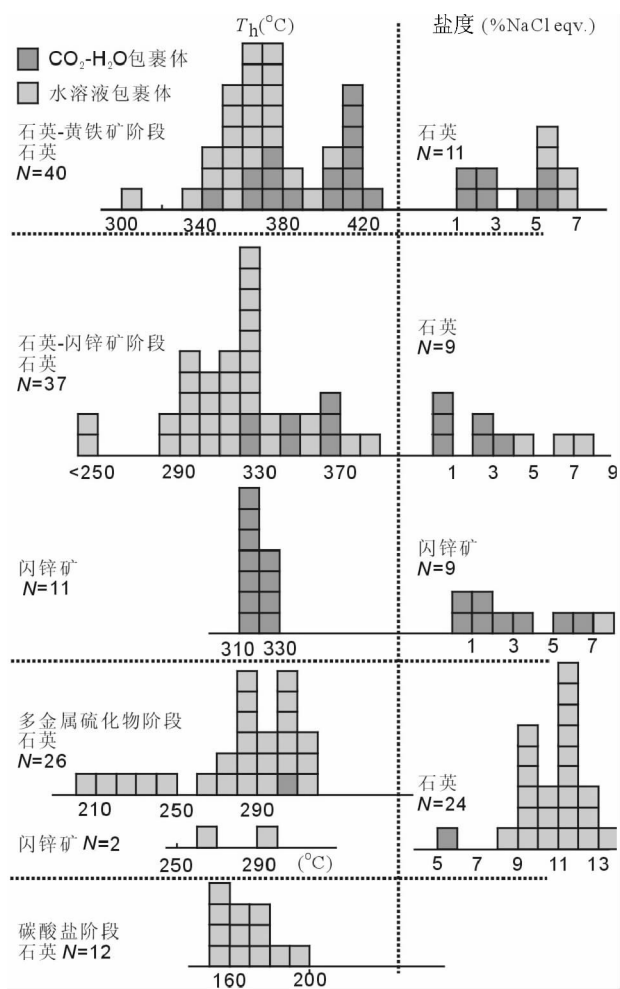


图7 冷水北沟矿床流体包裹体均一温度和盐度直方图

Fig. 7 Histograms of salinities and homogenization temperatures of fluid inclusions of the Lengshuigou deposit

在 III 阶段,包裹体以水溶液型为主体,偶见 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型和含子晶包裹体(图 4D, E, F)。其中,水溶液包裹体在 $-33.4^\circ\text{C} \sim -31.8^\circ\text{C}$ 时液相全冻,回温时得冰点温度为 $-9.9^\circ\text{C} \sim -5.5^\circ\text{C}$,对应的盐度为 $8.55 \sim 13.8 \text{ wt}\% \text{ NaCl eqv.}$,包裹体向液相均一,均一温度为 $209^\circ\text{C} \sim 313^\circ\text{C}$ 。 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体可见 $\text{CO}_2(\text{V}) + \text{CO}_2(\text{L}) + \text{H}_2\text{O}(\text{L})$ 三相,冷冻至约 -97°C 时液相全冻,回温时固相 CO_2 的熔化温度约为 -56.7°C ,与 CO_2 三相点温度(-56.6°C)接近,表明 CO_2 相较纯;进一步回温, CO_2 笼合物在 7.0°C 融化, CO_2 相在约 30.4°C 均一至气相,但包裹体多在完全均一前于 320°C 左右爆裂;其水溶液相的盐度为 $5.68 \text{ wt}\% \text{ NaCl eqv.}$ 。本阶段组合中发现 1 个含子晶包裹体,子晶为立方体晶形,推测为 NaCl ,加热至 600°C 仍未全熔,可能因包裹体泄漏所致。另外,线性分布的次生水溶液包裹体(图 4E)均一温度和盐度分别 $228^\circ\text{C} \sim 266^\circ\text{C}$ 和 $8.5 \sim 9.73 \text{ wt}\% \text{ NaCl eqv.}$,低于本阶段其它原生水溶液包裹体,应代表本阶段更晚的流体作用。本阶段闪锌矿少量水溶液型包裹体均一温度为 $260^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ 。

在 IV 阶段,即碳酸盐阶段,仅见水溶液包裹体,且均向液相均一,均一温度为 $150^\circ\text{C} \sim 190^\circ\text{C}$ 。

以上结果(图 7,表 2)表明:成矿流体为 $\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系,盐度为 $0.22 \sim 13.8 \text{ wt}\% \text{ NaCl eqv.}$ 。从早到晚,流体包裹体均一温度为 $420^\circ\text{C} \sim 340^\circ\text{C}$ (I)、 $370^\circ\text{C} \sim 280^\circ\text{C}$ (II)、 $320^\circ\text{C} \sim 260^\circ\text{C}$ (III) 和 $<260^\circ\text{C}$ (IV)。I、II 阶段的流体盐度低于 $8 \text{ wt}\% \text{ NaCl eqv.}$, III 阶段增高至 $13.8 \text{ wt}\% \text{ NaCl eqv.}$,甚至偶见子晶。自成矿早阶段至晚阶段, $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体逐渐减少,水溶液包裹体逐渐增多,均一温度降低,水溶液包裹体盐度升高;各阶段水溶液包裹体盐度高于同阶段 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体; III 阶段包裹体类型、均一温度、盐度等均较复杂,变化范围大。

静岩压力和静水压力的共存和交替现象是造山型矿床之赋矿断裂振荡性愈合-破裂的结果,即断层阀模式(Sibson, 1988; Cox *et al.*, 2001)的典型标志。具体而言,当挤压造成封闭体制的流体压力超过静岩压力时,围岩发生超压致裂,形成容矿空间,成矿流体积聚并发生减压沸腾作用,导致流体过饱和成矿物质快速沉淀,使断裂重新愈合(healing);断裂愈合使流体和能量再度封闭、积累,当流体压力超过围岩压力时再次发生围岩液压致裂-成矿物质沉淀-断裂愈合的过程。如此反复,耗尽成矿系统的能量,并形成矿床。无疑,该解释与冷水北沟矿床从早到晚成矿温度逐渐降低,CO₂-H₂O型包裹体逐渐减少,后两个阶段未发现静岩压力系统的包裹体等现象吻合。

流体包裹体均一温度和据此估算的成矿压力通常只能代表流体包裹体均一时温度和压力的最低值,但通过沸腾包裹体群所得的温度和压力可代流体包裹体表被捕获时的温度和压力。流体包裹体均一温度经过压力校正可求得真实的捕获温度。在本研究中,通过II阶段沸腾包裹体群所得温度和压力数据可代表流体包裹体的捕获温度和压力;考虑到获得的I、III阶段均一温度分别高于和低于II阶段温度,其相对关系准确,因此不再对包裹体均一温度进行压力校正。

4 矿床成因讨论

4.1 矿床成因类型

综前所述,冷水北沟矿床具有如下基本特征:

(1) 矿床产于秦岭中生代碰撞造山带北部的克拉通边缘的刚性基底推覆体内,矿石中的石英-氟-氩坪年龄为137.87 ± 0.39Ma,成矿作用与碰撞造山作用有密切的时间、空间联系,而且成矿作用发生在陆陆碰撞造山事件的挤压向伸展转换期。

(2) 矿床属于典型的断控脉状矿床,矿体产状与断裂构造一致,矿石组构显示成矿过程具有多阶段性,且早阶段为挤压构造环境,晚阶段为伸展环境。

(3) 早阶段(I阶段)矿物组合以石英-黄铁矿为特征,中阶段(II+III阶段)以多类硫化物、毒砂和自然银矿物为标志,晚阶段(IV阶段)为几乎不含矿的石英-碳酸盐网脉。

(4) 主要围岩蚀变为硅化、绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿化、多金属硫化物化等,垂向分带不清楚。

(5) 成矿压力范围为70~200MPa,成矿深度约为7~8km,成矿温度范围为150℃~425℃,集中于260℃~380℃,属于典型的中温中成矿床,且从早到晚温度、压力降低。

(6) 早、中阶段的成矿流体具有低密度、低盐度、富CO₂的特点,且CH₄含量较高,中、晚阶段的成矿流体以水溶液为主,CO₂含量低,基本不含CH₄。

所有上述特征与国内外典型造山型矿床(参见:Kerrich *et al.*, 2000; Hagemann and Luders, 2003; Groves *et al.*, 2003;

Chen *et al.*, 2005, 2006; 张静等, 2004, 2005, 2007; 陈华勇等, 2004, 2007; 李文博等, 2007)完全一致,指示冷水北沟铅锌银矿床应为造山型矿床。

4.2 成矿机制和过程

造山型矿床形成于板块会聚边缘的造山过程,目前已成为共识(Kerrich *et al.*, 2000; Groves *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2000)。通过研究美国阿拉斯加、加拿大阿比提比、澳大利亚伊尔岗等地的金矿床, Groves *et al.* (1998)和Goldfarb *et al.* (2001)先后提出了造山型金矿的连续地壳模式和增生型造山带的B型俯冲成矿模式,确定造山型矿床发育在弧前的俯冲增生楔内。根据我国丰富的碰撞造山带内蕴涵大量热液矿床,且大规模成矿事件明显滞后于古洋盆闭合时间,甚至滞后于陆陆碰撞起始时间,陈衍景和富士谷(1992)、Chen *et al.* (2004, 2005, 2006)提出并多次例证了碰撞造山成岩成矿与流体作用模式(CMF模式),即碰撞型造山带的A型俯冲成矿模式,将其模式D带的金、银、铜、铅、锌、钼等多类脉状矿床归为造山型矿床。

冷水北沟矿床位于秦岭碰撞造山带,氩-氩年龄为137.87 ± 0.39Ma(燕长海, 2004),处于侏罗纪-白垩纪之交;而秦岭造山带的“侏罗纪-白垩纪之交是秦岭造山带由碰撞挤压向伸展的转变期”(陈衍景和富士谷, 1992)。显然,冷水北沟矿床的形成适合于CMF模式解释。考虑到在马超营断裂和栾川断裂之间(图1)发育指向南的印支期-燕山期洛南-栾川推覆构造带(张国伟等, 2001),推覆构造带的发育应该耦合着沿栾川断裂的倾向北的A型俯冲作用。据此认为,沿栾川断裂的倾向北的A型俯冲板片的变质脱水和变质流体的向上迁移,诱发了冷水北沟成矿系统的发育,并为成矿系统提供了部分成矿流体、热能和成矿物质。因此,冷水北沟矿床成矿I、II阶段主要发育低盐度CO₂-H₂O型包裹体,且CH₄含量较高,属变质流体的典型特征(Kerrich *et al.*, 2000)。而且,矿石组构显示I、II阶段总体发生在挤压构造背景,恰是断层阀作用有利的构造环境(Sibson *et al.*, 1988; Sibson, 1994),例如,亚平宁山脉北部地区(Montomoli *et al.*, 2001)和小秦岭地区(张进江等, 1998)皆如此。断层阀作用导致反复的压力振荡,静岩压力的CO₂-H₂O型流体(高压组包裹体)密度较高,减压沸腾后,不仅使成矿系统的能量逸失,而且派生高CO₂/H₂O比值、低密度的CO₂-H₂O型包裹体和较高盐度的水溶液包裹体。因此,III阶段温度明显下降,发育较多盐度较高的水溶液包裹体,甚至偶见NaCl子晶;罕见CO₂-H₂O型包裹体,且几乎不含CH₄。III阶段包裹体的特征表明,此时流体系统已趋于开放,应处于后造山伸展环境。而IV阶段明显的张性结构构造、单一的包裹体类型和较低的包裹体均一温度等,均表明成矿流体系统已处于完全伸展的后造山背景。

总之,流体包裹体研究表明,冷水北沟矿床形成于由挤压转向伸展的构造背景,此与矿床地质的特征一致,也与前

人对整个秦岭地区造山过程和成矿作用演化的研究结果(陈衍景和富士谷, 1992; Chen *et al.*, 2005, 2006; 张进江等, 1998)吻合。

4.3 成矿与岩浆作用的关系

众所周知,造山型矿床发育在造山带,而造山带往往发育较多岩浆岩,因此造山型矿床形成与岩浆作用的关系问题长期为学者们所关注(Groves *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2005, 2006)。陈衍景和富士谷(1992)认为,陆陆碰撞体制的多数断控脉状矿床与花岗岩类、斑岩及其有关矿床之间属于“兄弟”,而非“母子”关系。

冷水北沟矿区东南 2km 处发育上房沟斑岩体及相关斑岩钼矿床,其斑岩全岩 K-Ar 年龄为 145Ma(罗铭玖等, 1991),钼矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄为 144.8 ± 2.1 Ma(李永峰, 2004),这些年龄略大于冷水北沟矿床的石英-钷年龄(137.87 ± 0.39 Ma),似显斑岩岩浆活动与冷水北沟矿床成矿系统发育的密切联系。但是,冷水北沟矿床的 I、II 成矿阶段缺乏高盐度流体包裹体,主要发育含较多 CH₄ 的低盐度 CO₂-H₂O 型包裹体,这一事实与岩浆流体成矿的特征不符,排除了其作为岩浆流体成矿的可能性;而且,斑岩系统的发育深度较浅(一般深度为 1~3km),斑岩成矿系统的深度因温度效应又略浅于斑岩岩体,因此,深度约 7~8km 的冷水北沟流体成矿体系与上房沟斑岩系统不可能有直接的成因联系。

5 结论

(1)河南栾川县冷水北沟超大型铅锌银矿床呈薄脉状赋存于华北克拉通南缘中一新元古代地层中,矿体定位受断裂构造控制,属于典型的断控脉状矿床;矿石结构和矿物组合具有多阶段特征,早阶段矿物组合显示变形和破碎现象。因此,矿床具有造山型矿床的矿床地质特征。

(2)矿床流体包裹体组合以含 CH₄ 的 CO₂-H₂O 型和和水溶液型为主,且从早到晚 CH₄ 含量减少,CO₂-H₂O 型包裹体减少,水溶液包裹体逐渐增多;流体包裹体均一温度为 420℃~340℃(I)、370℃~280℃(II)、320℃~260℃(III)和 <260℃(IV),逐渐降低;I、II 阶段的流体盐度低于 8 wt% NaCl eqv., III 阶段增高至 13.8 wt% NaCl eqv.,甚至偶见子晶。I、II 阶段的流体包裹体均一压力分为两组,即 180~200MPa 和 70~80MPa,代表着深约 8km 的静水与静岩压力系统的共存或交替,系断层闸作用引发流体沸腾所致;III 阶段压力为 70~80MPa,是沸腾后的静水压力系统。以上特征与典型造山型矿床流体系统及其演化规律一致,冷水北沟铅锌银矿床可能是世界首例断控脉状造山型铅锌(银)矿床。

(3)在构造环境上,矿区属于秦岭中生代碰撞造山带的刚性基底推覆体,矿床石英-钷年龄指示成矿作用发生在陆陆碰撞造山过程的挤压向伸展转变期,成因可以碰撞造山成岩成矿与流体作用模式阐述。

致谢 矿相学研究得到魏绮英教授指导,野外考察得到孙卫志和刘国印高级工程师的热情帮助,两位评审人提出了宝贵的修改意见,特此致谢!

References

- Angus S, Armstrong B de Ruek KM, Altumin VV, *et al.* 1976. International Thermodynamic Tables of the Fluid State, Carbon Dioxide. Oxford: Pergamon Press, 385
- Bodnar RJ. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683-684
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Henan Province. 1989. Regional Geology of Henan Province. Beijing: Geological Publishing House, 772 (in Chinese with English abstract)
- Chen HY, Chen YJ, Ni P and Zhang ZJ. 2007. Chemical composition of fluid inclusions of the Sawayardun gold deposit, Xinjiang and its implications for metallgeny and exploration. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2189-2197 (in Chinese with English abstract)
- Chen HY, Chen YJ, Ni P and Zhang ZJ. 2004. Fluid inclusion study of the Sawayardun Au deposit in southern Tianshan, China; Implication for ore genesis and exploration. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 46-54 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ. 2006. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential. *Geology in China*, 33, 1181-1196 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Pirajno F, Qi JP, Li J and Wang HH. 2006. Ore geology, fluid geochemistry and genesis of the Shangong gold deposit, eastern Qinling Orogen, China. *Resource Geology*, 56(2): 99-116
- Chen YJ and Fu SG. 1992. Gold Mineralization in West Henan, China. Beijing: Seismological Press, 234 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Li C, Zhang J, Li Z and Wang HH. 2000. Sr and O isotopic characteristics of porphyries in the Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type. *Science in China Series D*, 43(Supp.): 82-94
- Chen YJ, Pirajno F and Sui YH. 2004. Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, Henan, China; A case study of orogenic silver deposits and related tectonic setting. *Mineralium Deposita*, 39: 560-575
- Chen YJ, Pirajno F and Sui YH. 2005. Geology and D-O-C isotope systematics of the Tieluping silver deposit, Henan, China: Implications for ore genesis. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 106-119
- Chen YJ, Sui YH and Pirajno F. 2003. Exclusive evidences for CMF model and a case of orogenic silver deposits; Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, east Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 551-568 (in Chinese with English abstract)
- Chen YL and Zhang BR. 1994. Pb, Sr and Nd isotope geochemistry of Yanshanian and granitoids on southern margin of North China Craton in western Henan Province. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 19(3): 375-382 (in Chinese with English abstract)
- Collins PLF. 1979. Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47: 1681-1693
- Cox SF, Knackstedt MA and Braun J. 2001. Principles of structural control on permeability and fluid flow in hydrothermal system. *SEG Reviews*, 14: 1-24
- Goldfarb RJ, Groves DI and Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18: 1-75

- Groves DI, Goldfarb RJ, Gebre-Mariam M, Hagemann SG and Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13: 7–27
- Groves DI, Goldfarb RJ, Robert F and Hart JRC. 2003. Gold deposits in Metamorphic Belts: Overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Economic Geology*, 98: 1–29
- Hagemann SG and Luders V. 2003. *P-T-X* conditions of hydrothermal fluids and precipitation mechanism of stibnite-gold mineralization at the Wiluna lode-gold deposits, Western Australia: Conventional and infrared microthermometric constraints. *Mineralium Deposita*, 38: 936–952
- Hu SX, Lin QL, Chen ZM and Li SM. 1988. Geology and Metallogeny of the Collision Belt Between North China and South China Plates. Nanjing: Nanjing University Press, 558 (in Chinese with English abstract)
- Kerrick R, Goldfarb RJ, Groves DI, Garwin S and Jia YF. 2000. The characteristics, origins and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. *Sci. China Ser. D*, 43 (supp): 1–68
- Li WB, Chen YJ and Lai Y. 2007. The Bainaimiao Cu deposit, Inner Mongolia, China: A typical orogenic-type Cu deposit constrained by microthermometric study of fluid inclusions. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2165–2176 (in Chinese with English abstract)
- Li YF, Wang CQ, Bai FJ and Song YL. 2004. Re-Os isotopic ages of Mo deposits in east Qinling and their geodynamic settings. *Mineral Resources and Geology*, 18(6): 571–578 (in Chinese with English abstract)
- Li ZJ, Luo TC and Zhang BR. 1994. Geochemical characteristics and spatial compositional variation of Yanshanian intraplate granite-Porphyrries on southern margin of North China craton. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 19(3): 383–389 (in Chinese with English abstract)
- Luo MJ, Zhang FM and Dong QY (ed.). 1991. Molybdenum deposits in China. Zhengzhou: Henan Science Technology Press, 452 (in Chinese with English abstract)
- Mernagh TP, Bastrakov EN, Zaw Khin, Wygralak AS and Wyborn LAI. 2007. Comparison of fluid inclusion data and mineralization processes for Australian Orogenic Gold and Intrusion-Related Gold Systems, *Acta Petrologica Sinica*, 23(1): 21–32
- Montomoli C, Ruggieri G, Boiron MC and Cathelineau M. 2001. Pressure fluctuation during uplift of the Northern Apennines (Italy): A fluid inclusions study. *Tectonophysics*, 341: 121–139
- Qi JP, Zhang J and Tang GJ. 2005. Carbon and oxygen isotope composition of the Meso-Neoproterozoic strata south of the Xiong'er Terrane: evidence of the CMF model. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1365–1372 (in Chinese with English abstract)
- Schwartz MO. 1989. Determining phase volumes of missed CO₂-H₂O inclusions using microthermometric measurements. *Mineralium Deposita*, 24: 43–47
- Sibson RH, Robert F and Poulsen H. 1988. High angle reverse faults, fluid pressure cycling and mesothermal gold quartz deposits. *Geology*, 16: 551–555.
- Sibson RH. 1994. Crustal stress, faulting, and fluid flow. In: Parnell J (ed). *Geofluids: Origin, Migration and Evolution of Fluids in Sedimentary Basins*. Geological Society, London, 78: 69–84.
- Wilkinson JJ. 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55: 229–272
- Xu ZW, Lu XC, Yang RY, Xie XJ and Ren QJ. 2000. Geochemistry and metallogenesis of the Shangfang porphyry molybdenum deposit in Luanchuan, Henan. *Geology and Prospecting*, 36(1): 14–16 (in Chinese with English abstract)
- Yan CH. 2004. Study on Inner Structure of Lead-Zinc-Silver Mineralization System in Eastern Qinling. Beijing: Geological Publishing House, 144 (in Chinese with English abstract)
- Ye HS, Mao JW, Li YF, *et al.* 2006. Characteristics and metallogenic mechanism of Mo-W and Pb-Zn-Ag deposits in Nannihu ore field, Western Henan Province. *Geoscience*, 20(1): 165–174 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC and Xiao QH. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 855 (in Chinese)
- Zhang J, Chen YJ, Chen HY, Wan SQ, Zhang G and Wang JM. 2007. Isotope geochemistry of the Yindongpo gold deposit, Tongbai County, Henan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2217–2226 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J, Chen YJ, Li GP, Li ZL and Wang ZG. 2004. Characteristics of ore geology and fluid inclusion of the Yindonggou silver deposit, Neixiang county, Henan province: implication for metallogenic type. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 55–64 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J and Chen YJ. 2005. Ore Geology and Fluid-system of the Yindonggou Ag Deposit, Henan: Implication for Genetic Type. Beijing: Extended Abstract of SGA2005 Conference, Springer, 1005–1008
- Zhang J, Yan GP, Ye L, Li GP, Li ZL and Wang ZG. 2005. The C-H-O isotope systematics of the Yindonggou Ag-dominated poly-metals deposit in the Neixiang county, Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1359–1364 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JJ, Zheng YD and Liu SW. 1998. The Xiaoqinling Metamorphic Core Complex: Structure, Genetic Mechanism and Evolution. Beijing: Ocean Press of China, 120 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈华勇, 陈衍景, 倪培, 张增杰. 2007. 新疆萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体成分及其成矿和勘探意义. *岩石学报*, 23(9): 2189–2197
- 陈华勇, 陈衍景, 倪培, 张增杰. 2004. 南天山萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体研究: 矿床成因和勘探意义. *矿物岩石*, 24(3): 46–54
- 陈衍景, 2006. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力. *中国地质*, 33: 1181–1196
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社, 234
- 陈衍景, 隋颖慧, Pirajno F. 2003. CMF模式的排他性证据和造山型银矿的实例: 铁炉坪银矿同位素地球化学. *岩石学报*, 19(3): 551–568
- 陈岳龙, 张本仁. 1994. 华北克拉通南缘豫西燕山期花岗岩类的 Pb, Sr, Nd 同位素地球化学特征. *地球科学(中国地质大学学报)*, 19(3): 375–382
- 河南省地质调查院. 2006. 河南卢氏-栾川地区铅锌银矿评价成果报告.
- 河南省地质矿产局. 1989. 河南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 772
- 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭, 黎世美. 1988. 华北与华南古板块拼合带地质与成矿. 南京: 南京大学出版社, 558
- 李文博, 陈衍景, 赖勇. 2007. 内蒙古白乃庙铜矿: 流体包裹体研究证实的典型造山型铜矿床. *岩石学报*, 23(9): 2165–2176
- 李永峰, 王春秋, 白凤军, 宋艳玲. 2004. 东秦岭钼矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿动力学背景. *矿产与地质*, 18(6): 571–578
- 李泽九, 骆庭川. 1994. 华北地台南缘燕山期板内花岗岩斑岩类地球化学特征及成分空间变化规律. *地球科学(中国地质大学学报)*

- 报), 19(3): 383-389
- 罗铭玖, 张辅民, 董群英等, 1991. 中国钼矿床. 郑州: 河南科学技术出版社, 452
- 祁进平, 张静, 唐国军. 2005. 熊耳地体南侧中晚元古代地层的碳氧同位素组成: CMF 模式的证据. 岩石学报, 21(5): 1365-1372
- 徐兆文, 陆现彩, 杨荣勇等. 2000. 河南省栾川县上房斑岩钼矿床地质地球化学特征及成因. 地质与勘探 36(1): 14-16
- 燕长海. 2004. 东秦岭铅锌银成矿系统内部结构. 北京: 地质出版社, 144
- 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 燕长海, 郭保健, 赵财胜, 何春芬, 郑榕芬, 陈莉. 2006. 豫西南泥湖矿田钼钨及铅锌银矿床地质特征及其成矿机理探讨. 现代地质, 20(1): 165-174
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉(主编), 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 855
- 张进江, 郑亚东, 刘树文. 1998. 小秦岭变质核杂岩的构造特征、形成机制及构造演化. 北京: 海洋出版社, 120
- 张静, 陈衍景, 陈华勇, 万守全, 张冠, 王建明. 2007. 河南省桐柏县银洞坡金矿床同位素地球化学. 岩石学报, 23(9): 2217-2226
- 张静, 陈衍景, 李国平, 李忠烈, 王志光. 2004. 河南内乡县银洞沟银矿地质和流体包裹体特征及成因类型. 矿物岩石, 24(3): 55-64
- 张静, 燕光谱, 叶霖, 李国平, 李忠烈, 王志光. 2005. 河南内乡县银洞沟银多金属矿床碳-氢-氧同位素地球化学. 岩石学报, 21(5): 1359-1364