文章编号：1004—5589（2017）01—0105—13

内蒙古维拉斯托铅锌矿床流体包裹体特征及矿床成因研究

权鸿雁[1]，蔡文艳[1]，张雪冰[1]，付丽娟[2]，王可勇[1]

1. 吉林大学 地球科学学院，长春 130061；
2. 内蒙古山金地质矿产勘查有限公司，内蒙古 赤峰 024000

摘要：维拉斯托铅锌矿床发育在大兴安岭南段西坡成矿带内。矿区出露的岩浆岩主要为石英闪长岩、花岗闪长岩以及碱性花岗岩等；矿体严格受断裂构造控制，属典型的热液脉型矿床。矿床的热液期可划分为3个阶段：Ⅰ石英-毒砂-黄铁矿阶段、Ⅱ多金属硫化物-石英阶段和Ⅲ石英-碳酸盐阶段。流体包裹体研究表明，维拉斯托矿床矿石主要发育气液两相、富CH_4以及含CH_4-CO_2的包裹体。Ⅰ阶段3种类型包裹体均发育，Ⅱ阶段以气液两相和含CH_4-CO_2的包裹体为主，Ⅲ阶段仅发育气液两相包裹体。Ⅰ阶段包裹体均一温度范围为243.1℃～398.5℃，盐度为4.8%～12% NaCleqv；Ⅱ阶段均一温度为190.0℃～331.1℃，盐度为3.5%～9.1% NaCleqv；Ⅲ阶段均一温度范围为180.0℃～240.0℃，盐度范围为3.7%～6.7% NaCleqv，显示成矿流体具有中温、低盐度和低密度的特点；激光拉曼光谱分析包裹体气相成分主要为CO_2、CH_4和H_2O。氢、氧同位素分析结果表明成矿流体具有岩浆水和大气降水的混合特征；硫同位素结果显示成矿物质具有深源的特点。综合分析认为，矿床的形成与燕山期中酸性岩浆活动密切相关，深部岩浆在上升过程中与下渗的大气降水发生混合，导致矿物质在近东西向的“S”型压扭性断裂中沉淀并富集成矿。

关键词：流体包裹体；稳定同位素；维拉斯托；大兴安岭

中图分类号：P618.4；P611　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3969/j.issn.1004-5589.2017.01.009

Characteristics of fluid inclusions and genesis of Weilasituo Pb-Zn deposit, Inner Mongolia

QUAN Hong-yan[1], CAI Wen-yan[1], ZHANG Xue-bing[1], FU Li-juan[2], WANG Ke-yong[1]

1. *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China*;
2. *Inner Mongolia Shandong Gold Geological Minerals Survey Co., Ltd, Chifeng 024000, Inner Mongolia, China*

Abstract: The Weilasituo deposit is mainly hosted in southern Great Hinggan Mountain metallogenic belt. The intrusive rocks exposed in the study area are mainly quartz diorite, granodiorite and alkali granite. Ore bodies are strictly controlled by fracture structures, which is an important character of the hydrothermal vein type lead-zinc deposit. The mineralization can be divided into Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ stages, characterized by assemblages of quartz-arsenopyrite-pyrite, quartz-polymetallic sulfide and quartz-carbonate, respectively. Systematic study on fluid inclusions reveals that there existed three types of primary fluid inclusions in the ores, which were two-phase aqueous, CH_4 rich and CH_4-CO_2 bearing fluid inclusions. All the three types of fluid inclusions were developed in stage Ⅰ. The primary fluid inclusions in stage Ⅱ were mainly composed of two-phase aqueous and CH_4-CO_2 bearing fluid inclu-

收稿日期：2016-06-24；**改回日期**：2017-01-03
基金项目：内蒙古西乌珠穆沁旗布金黑铅锌多金属矿成矿规律与找矿方法研究（SJ-2013-02）资助.
通讯作者：王可勇（1965-），男，教授，博士生导师，主要从事矿产勘查与普查和矿床学方面研究. E-mail：wangky@jlu.edu.cn

sions, while only two-phase aqueous fluid inclusions were developed in stage Ⅲ. Homogenization temperatures of fluid inclusions in stage I ranged from 243.1℃ to 398.5℃, with salinities of 4.8% ~12% NaCleqv. For stage Ⅱ, homogenization temperatures decreased to 190.0℃ ~331.1℃, salinities changed to 3.5% ~9.1% NaCleqv, whereas for stage Ⅲ homogenization temperature was 180.0℃ ~240.0℃, with salinities of 3.7% ~6.7% NaCleqv, indicating intermediate temperate and low salinity mineralizing liquids. The analytic results from Laser Laman Spectroscopy suggest that the gas phases are rich in CH_4, CO_2 and H_2O. The analytic results from H and O isotope indicate that the mineralizing fluids were derived from magmatic water mixing with meteoric water. The study of S isotope implies that the ore forming materials were from a deep source. Combining all the analytical results and regional setting, it is concluded that Weilasituo deposit was related to the Yanshanian magmatism, and was formed by the precipitation of mineralizing materials in the west-east trending "S" shape compression fault during the mixing of magmatic water and meteoric water.

Key words: fluid inclusion; stable isotope; Weilasituo; Great Hinggan Mountain

0 引言

维拉斯托矿床位于内蒙古赤峰市克什克腾旗与林西县、西乌珠穆沁旗交界的克什克腾旗一侧。矿区面积为 10.79 km^2，目前共探明矿石储量 11×10^6 t，是21世纪以来在大兴安岭南段西坡成矿带发现的一个大型铅锌多金属矿床[1]。

前人对本矿区的成矿物质、成矿流体来源、地球化学和同位素定年等方面进行了一系列研究，提出维拉斯托矿床是与燕山期花岗岩侵入体有关的岩浆热液矿床，其中，郑翻身[2]等通过对该区域的物化探异常对其储量进行了估算，铅锌铜约为 6×10^6 t，银为 1×10^4 t；江思宏对本区2个矿床进行了硫和铅的同位素研究，提出硫可能来源于岩浆，而铅同位素可能来源于围岩地层和深层岩浆[3]；梅微等提出维拉斯托的成矿机制主要与降温和流体不混溶有关[4]；王瑾[5]、刘翼飞[6]及欧阳荷根[7,8]等对维拉斯托铅锌矿床的流体特征以及火成岩与成矿之间的关系进行了研究，均认为该矿床与燕山期中酸性岩浆活动密切相关，为深部岩浆在上升过程中与下渗的大气降水发生混合，成矿物质在有利部位沉淀富集的结果；潘小菲等利用 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 法对白云母进行测年，测定了成矿年龄的下限[9]。尽管前人研究成果丰富，但对矿床成矿的系统研究还有待进一步加强，例如对特殊类型包裹体需要进行科学规范的测试与分析，这样分析结果才更为准确，为总结矿床成因提供科学准确依据。笔者对维拉斯托铅锌矿床进行系统的流体包裹体岩相学、显微测温、激光拉曼分析和H、O、S同位素地球化学等研究，讨论矿床成矿流体的特征及演化，并对矿床成因进行更深入的的探讨。

1 区域地质背景

矿区位于大兴安岭南段西坡中生代岩浆岩带中，米生庙复背斜的东南侧，锡林浩特地块的腹地[1]。除广泛分布的第四系沉积物外，在此区域内还出露由黑云斜长片麻岩和斜长角闪片麻岩组成的古生代变质杂岩（锡林郭勒杂岩）、石炭系的本巴图组和阿木山组、二叠系大石寨组和林西组、中生界侏罗系的万宝组和满克头鄂博组。石炭系本巴图组主要岩性为灰岩、钙质砂岩，上层的阿木山组则为海相结晶灰岩；二叠系下统的大石寨组主要为安山质火山岩，有一些地方可见发育枕状构造，上统的林西组出露岩性为黑灰色的粉砂岩和板岩；侏罗系的万宝组和满克头鄂博组主要由流纹岩、火山碎屑岩和流纹质凝灰岩组成[7]。区域内的构造主要为NE向和NNE向断裂，岩浆活动强烈，沿着断裂裂隙产出，形成大量的石英闪长岩、花岗闪长岩及碱性花岗岩，燕山期花岗岩类侵入岩与区内金属矿化密切相关[10-13]。

2 矿床地质特征

维拉斯托铅锌矿区内出露的地层十分简单，主要为呈北东向展布的变质杂岩，岩性为黑云斜长片麻岩，局部可见少量斜长角闪片麻岩[1]，并大面积被第四系覆盖，矿体多赋存于该组地层内。区内岩浆岩较少，仅见出露矿区南部的石炭系的石英闪长岩，岩脉沿NE-NNE向断层出露，并侵入古生

代变质杂岩。NE 向断裂为成矿流体提供了运移通道，是矿化富集的有利部位（图 1）。

矿体主要以脉状、透镜体状产出，除个别倾向为 NNW 向，矿体多数倾向为 EW 向，倾角 8° ~ 35°。矿区内的 NE 向断裂是成矿流体的运移通道，也就使其成为矿区内的有利富矿部位。维拉斯托矿床共有 35 个矿体（2 个地表可见，其余的 33 个为隐伏矿体），其中 1 号体为主矿体。矿体的长度从 368 ~ 1 057 m 不等，宽度为 1 ~ 4 m，深度为 250 ~ 900 m 不等。前人对晚阶段白云母用 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 测年方法，得到成矿年代为（133.4 ± 0.8）Ma[9]。

维拉斯托矿床矿石主要为硫化物矿石，其次为氧化物矿石，混合矿极少见。硫化物矿石的主要矿石矿物有毒砂、磁黄铁矿和闪锌矿等。次要矿物有黄铜矿、方铅矿、黄铁矿等。脉石矿物为石英、萤石和伊利石等。由于地表淋滤作用影响，氧化物矿石品位普遍偏低。

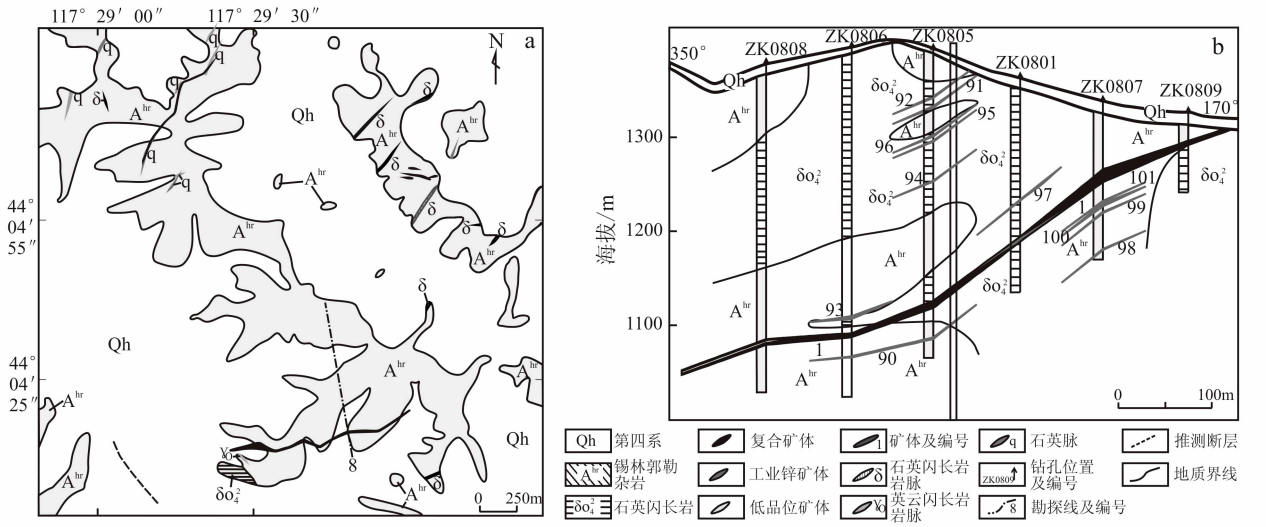


图 1　维拉斯托矿区简图（a）及第八号勘探线剖面图（b）[1]

Fig. 1　Geological map of Weilasituo deposit（a）and cross section of No. 8 prospecting line in Weilasituo deposit（b）

矿石多数以块状、脉状或角砾状构造产出（图 2）。毒砂和黄铁矿主要呈半自形-他形晶粒状结构和骸晶结构（图 3a，b，c）；黄铜矿主要呈他形填充于闪锌矿、磁黄铁矿和方铅矿晶间裂隙中（图 3d，e，f），以及少数黄铜矿呈乳滴状结构、叶片状结构分布在闪锌矿中（图 3h）。还可见到黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿、闪锌矿等被交代而形成的交代港湾和交代残余结构。

根据野外和实验室显微观察矿脉穿切关系、矿石组构以及矿物组合，本文将维拉斯托的热液期划分为 3 个阶段：Ⅰ石英-毒砂-黄铁矿阶段，主要矿物组合为毒砂和黄铁矿；Ⅱ多金属硫化物-石英阶段；Ⅲ石英-碳酸盐阶段。

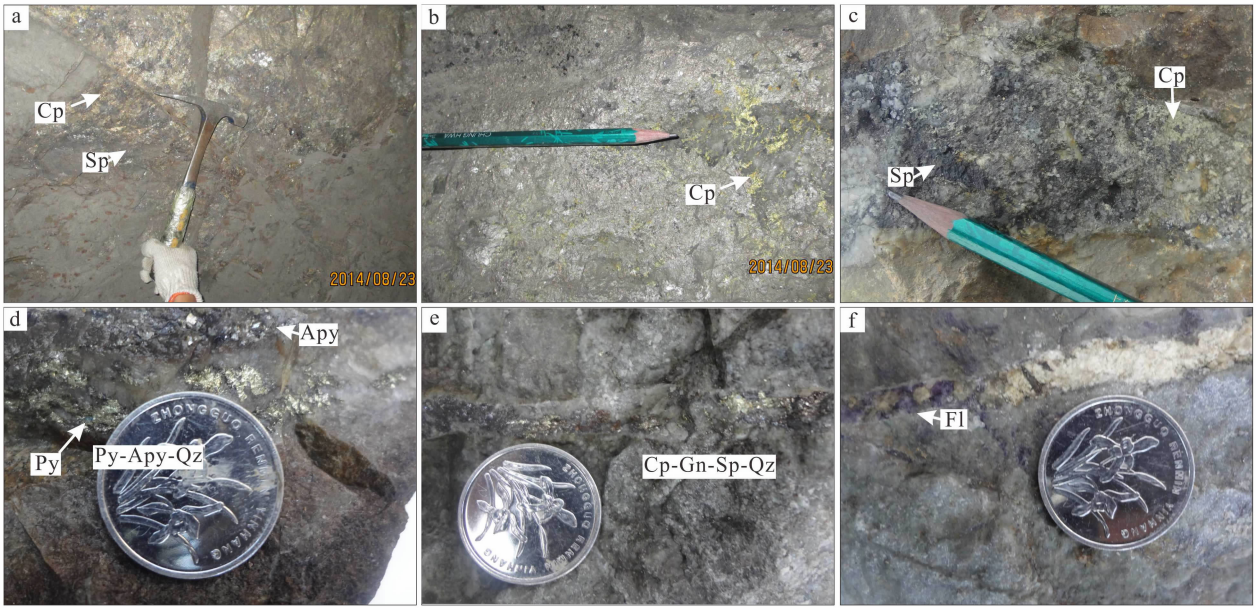
围岩蚀变较为发育，主要有硅化、绿泥石化和碳酸盐化。各阶段的围岩蚀变根据矿化不同具有一定差异，Ⅰ、Ⅱ阶段主要发育绿泥石化和硅化，局部可见泥质蚀变；Ⅲ阶段主要发育方解石化和绿泥石化。

3　流体包裹体研究

3.1　样品制备及测试方法

为进一步研究维拉斯托矿床成矿流体特征和成矿机制，在对矿床地质特征进行详细野外调研的基础上，采集了矿区内不同阶段的 12 件含矿石英脉样品进行系统的流体包裹体研究。其中包裹体的岩相学、显微测温学以及激光拉曼光谱成分，使用仪器分别为 Linkam THMS-600 型冷热两用台及 Renishaw System-1000 型激光拉曼光谱仪，测温精度 <31℃时为 ±0.1℃，>31℃时为 ±2℃，分析测试均在吉林大学地球科学学院地质流体实验室完成。

H、O、S 同位素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成，采用 MAT253 质谱仪进



a. 黄铜矿和闪锌矿块状矿石；b. 黄铜矿矿脉；c. 闪锌矿黄铜矿矿脉；d. Ⅰ阶段黄铁矿毒砂石英脉；e. Ⅱ阶段黄铜矿方铅矿闪锌石英脉；f. Ⅲ阶段的萤石脉；Apy. 毒砂；Cp. 黄铜矿；Sp. 闪锌矿；Gn. 方铅矿；Py. 黄铁矿；Qz. 石英

图 2 维拉斯托铅锌矿床野外及矿石照片

Fig. 2 Field and orebody photographs of Weilasituo Pb-Zn deposit

行测试分析，氧同位素的分析精度为 $\pm 0.2\times10^{-3}$，氢同位素的分析精度为 $\pm 2\times10^{-3}$，硫同位素测试精度为 $\pm 0.2\times10^{-3}$；δD 和 δ^{18}O 以 SMOW 为标准，δ^{34}S 以 CDT 为标准。计算石英单矿物中流体包裹体 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 时，根据公式：$\delta^{18}O_{V-SMOW}-\delta^{18}O_{H_2O}=3.38\times10^6/T^2-2.9$ 进行计算[14]。

3.2 流体包裹体岩相学

本次研究对维拉斯托各阶段包裹体分别进行了岩相学和显微测温分析，测试矿物为石英。根据 Roedder[15] 和卢焕章[16] 对包裹体成因判别，所测的大部分包裹体均为原生包裹体，只有少数为次生包裹体。岩相学观察显示，矿床主要发育富 CH_4、$CH_4-CO_2-H_2O$ 以及常见的气液两相（H_2O）3 种类型包裹体（图 4）。具体特征为：

（1）富 CH_4 包裹体

这类包裹体室温下呈圆形、椭圆形，由超临界液态泡和水组成，气液比多数为 20% ~60%，包裹体大小大多集中在 10 ~20 μm。富 CH_4 包裹体主要出现在石英-毒砂-黄铁矿（Ⅰ）阶段。

（2）$CH_4-CO_2-H_2O$ 包裹体

这类包裹体在室温下的大小和形态与富 CH_4 的包裹体十分相似，只是超临界液泡成分变为 CH_4-CO_2，如非使用冷冻测温法很难将二者区别开来[17]。气液比多数为 20% ~50%。这类包裹体出现在石英-毒砂-黄铁矿（Ⅰ）阶段及多金属硫化物-石英（Ⅱ）阶段。

（3）气液两相包裹体

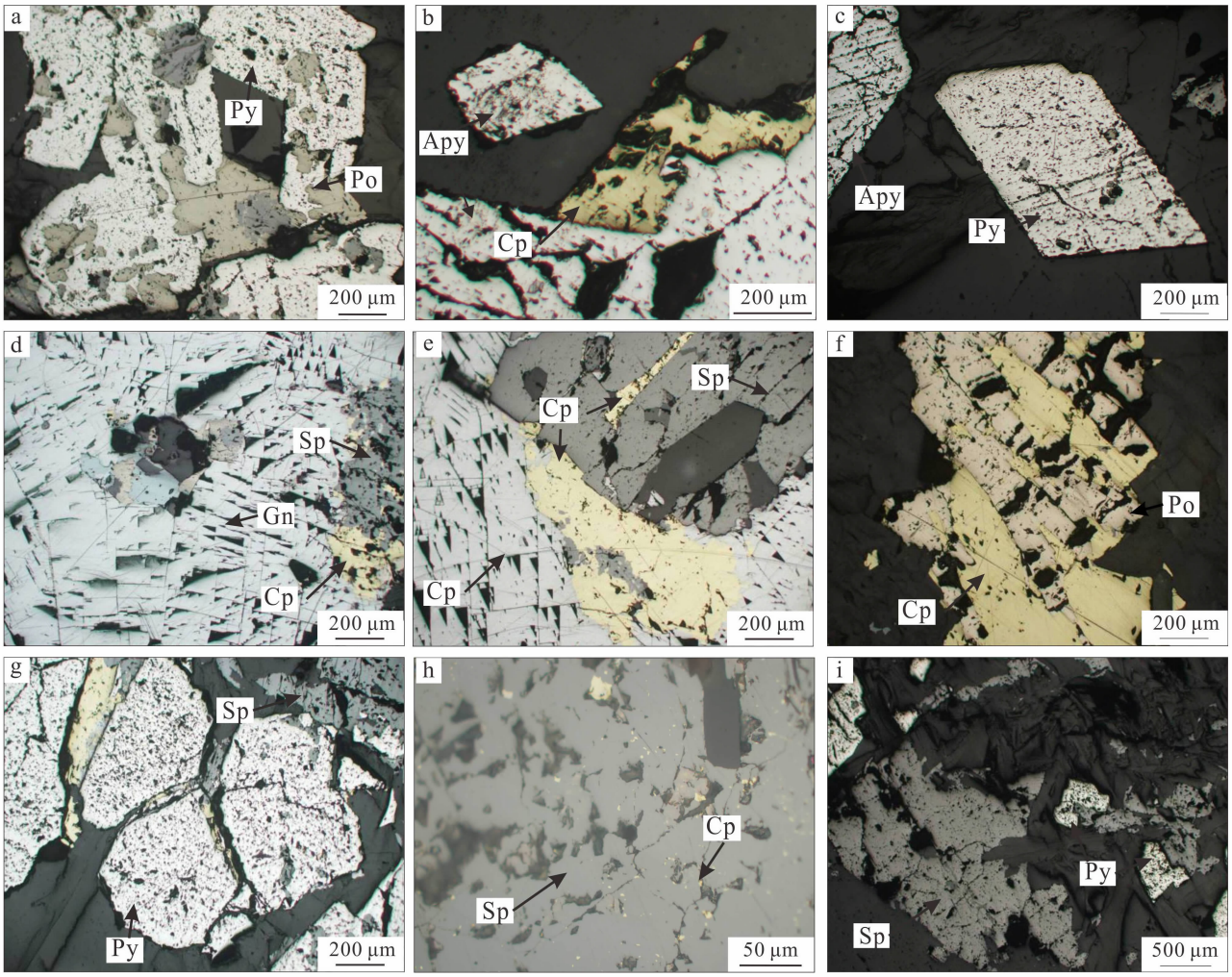
室温下，该类包裹体一般为椭圆形、长条形或不规则形状，由气相和液相两相组成，气液比为 10% ~40%，大小集中在 10 ~16 μm。气液两相包裹体广泛存在于 3 个成矿阶段中，是最普遍的包裹体类型。

3.3 流体包裹体显微测温

各成矿阶段的包裹体显微测温数据列在表 1 中。

3.3.1 *石英-毒砂-黄铁矿阶段*

富 CH_4 包裹体（V）：冷冻降温过程中，当温度 < -100℃时，包裹体出现液态泡，包裹体在降至 -185℃ ± 时完全冻结。升温至 -180.6℃ ~ -183.0℃时（图 5A），包裹体中的固体在纯 CH_4 三相点附近开始融化[18]，继续升温至 -100.1℃ ~ -79.6℃包裹体部分均一至液相。升温至7.2℃ ~



a. 磁黄铁矿交代黄铁矿；b. 黄铜矿交代毒砂；c. 自形晶黄铁矿；d. 方铅矿特征黑三角，并被闪锌矿和黄铜矿交代；e. 黄铜矿充填于闪锌矿裂隙中；f. 黄铜矿交代磁黄铁矿；g. 黄铜矿、闪锌矿充填于黄铁矿裂隙中；h. 黄铜矿呈乳滴状分布在闪锌矿中；i. 闪锌矿交代黄铁矿；Gn. 方铅矿，Sp. 闪锌矿；Cp. 黄铜矿；Py. 黄铁矿；Apy. 毒砂；Po. 磁黄铁矿

图 3　维拉斯托铅锌矿床矿石显微照片

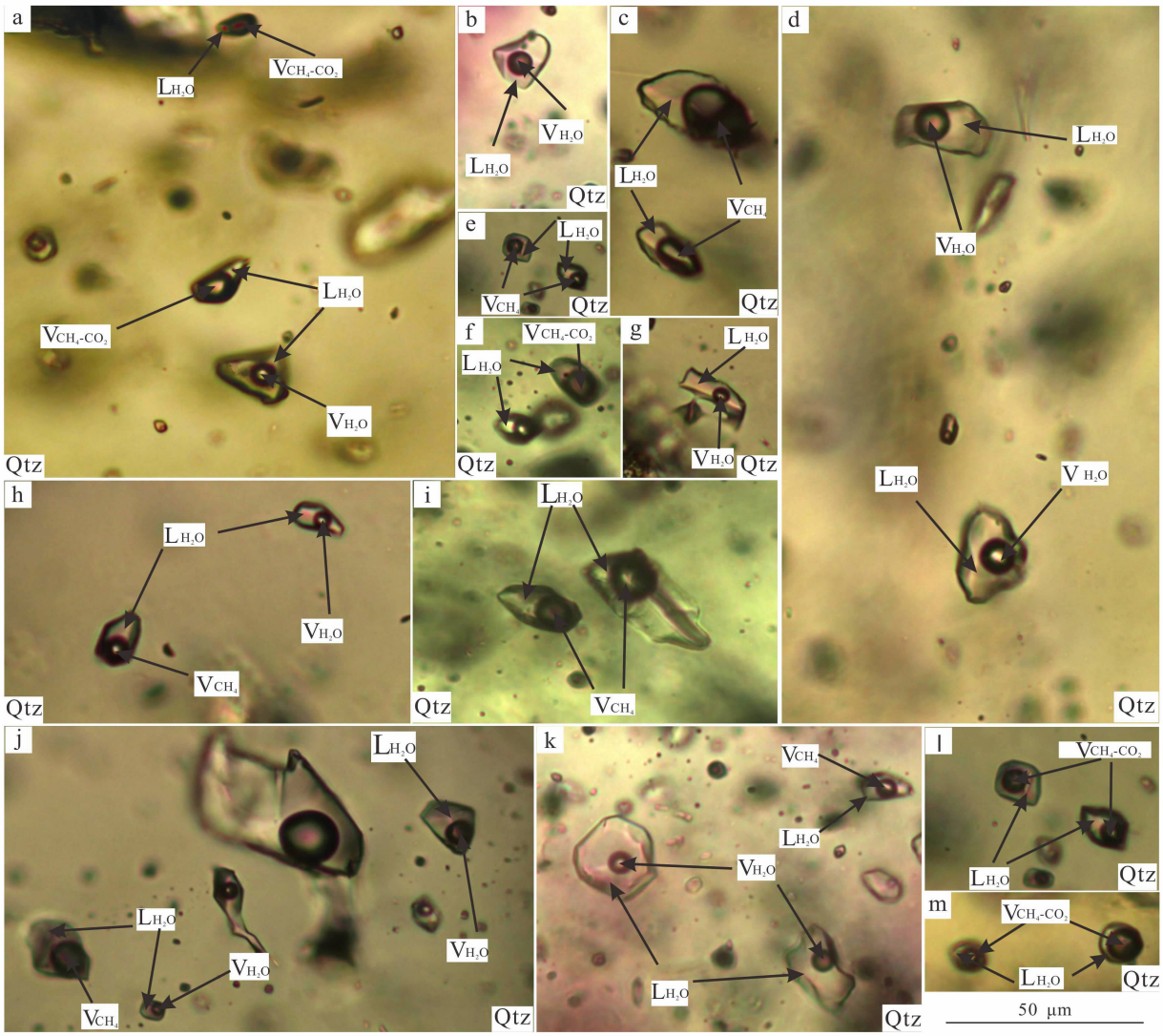
Fig. 3　Microphotographs of ore texture and structure of Weilasituo Pb-Zn deposit

表 1　维拉斯托矿床流体包裹体测温结果

Table 1　Thermometric data of fluid inclusions of Weilasituo deposit

阶段	取样位置	包裹体类型	数量	tm(car)/℃	th(car)/℃	tm(clath) /℃	ti/℃	盐度/% NaCleqv	th(tot)/℃
	石英	富 CH_4	10	−180.6 ~ −183	−78.2 ~ −100.1	7.2 ~ 18.3			248.7 ~ 398.5
Ⅰ	石英	$CH_4-CO_2-H_2O$	10	−58.1 ~ −82	−4.4 ~ −58	6.8 ~ 12.1			242.1 ~ 334.5
	石英	气液两相	15				−2.9 ~ −8.2	4.8 ~ 12	246.5 ~ 335.1
Ⅱ	石英	$CO_2-H_2O \pm CH_4$	15	−56.8 ~ −78.5	−8.4 ~ −51.2	8.2 ~ 13.4			206.7 ~ 331.1
	石英	气液两相	15				−2.1 ~ −5.9	3.5 ~ 9.1	190.0 ~ 295.6
Ⅲ	石英	气液两相	10				−2.2 ~ −4.2	3.7 ~ 6.7	180 ~ 241

注：tm（car）－含碳相的融化温度；th（car）－含碳相的部分均一温度；tm（clath）－笼形物消失温度；ti－冰点；th（tot）－完全均一温度.



a、c、d、g、h、i、j：Ⅰ阶段包裹体；b、e、k、m：Ⅱ阶段包裹体；f：Ⅲ阶段包裹体；L_{H_2O}- 液态水；V_{H_2O}- 气态水；V_{CH_4}- 气态甲烷；$V_{CH_4-CO_2}$- 气态甲烷和二氧化碳；Qtz. 石英.

图 4 维拉斯托铅锌矿床流体包裹体显微照片

Fig. 4 Micrographs of fluid inclusions of Weilasituo Pb-Zn deposit

18.3℃时笼形物消失。气液比高的包裹体大多在200℃～345℃发生爆裂，从气液比较低的包裹体中可得到完全均一温度为 248.7℃～398.5℃（图5B）。计算得到密度为 0.20～0.31 g/cm^3[19]。

$CH_4-CO_2-H_2O$ 包裹体（VL）：这类包裹体在完全冻结后，在逐渐升温时可见，固相初融的温度低于 CO_2 的三相点（－56.6℃）较多，为－82.0℃～－58.1℃（图5C），表明包裹体中含有 CH_4 等组分。升温过程中观测到，不同的包裹体部分均一温度区间为－4.4℃～－58.0℃，笼形物融化温度（$t_{m(clath)}$）为 6.8℃～12.1℃，完全均一温度为 242.1℃～334.5℃（图5B）。由于 CH_4 的存在，CH_4-CO_2 的笼形物融化温度大多＞10℃。计算得到的含碳相密度为 0.95～1.17 g/cm^3。

气液两相包裹体（L）：这类包裹体在冷冻-升温过程中，测得冰点温度为－2.9℃～－8.2℃(图5D)，对应包裹体盐度为 4.8%～12% NaCleqv[20]；包裹体均一温度为 246.5℃～335.1℃（图5E）；根据均一温度及对应盐度值，估算流体密度为 0.77～0.86 g/cm^3。

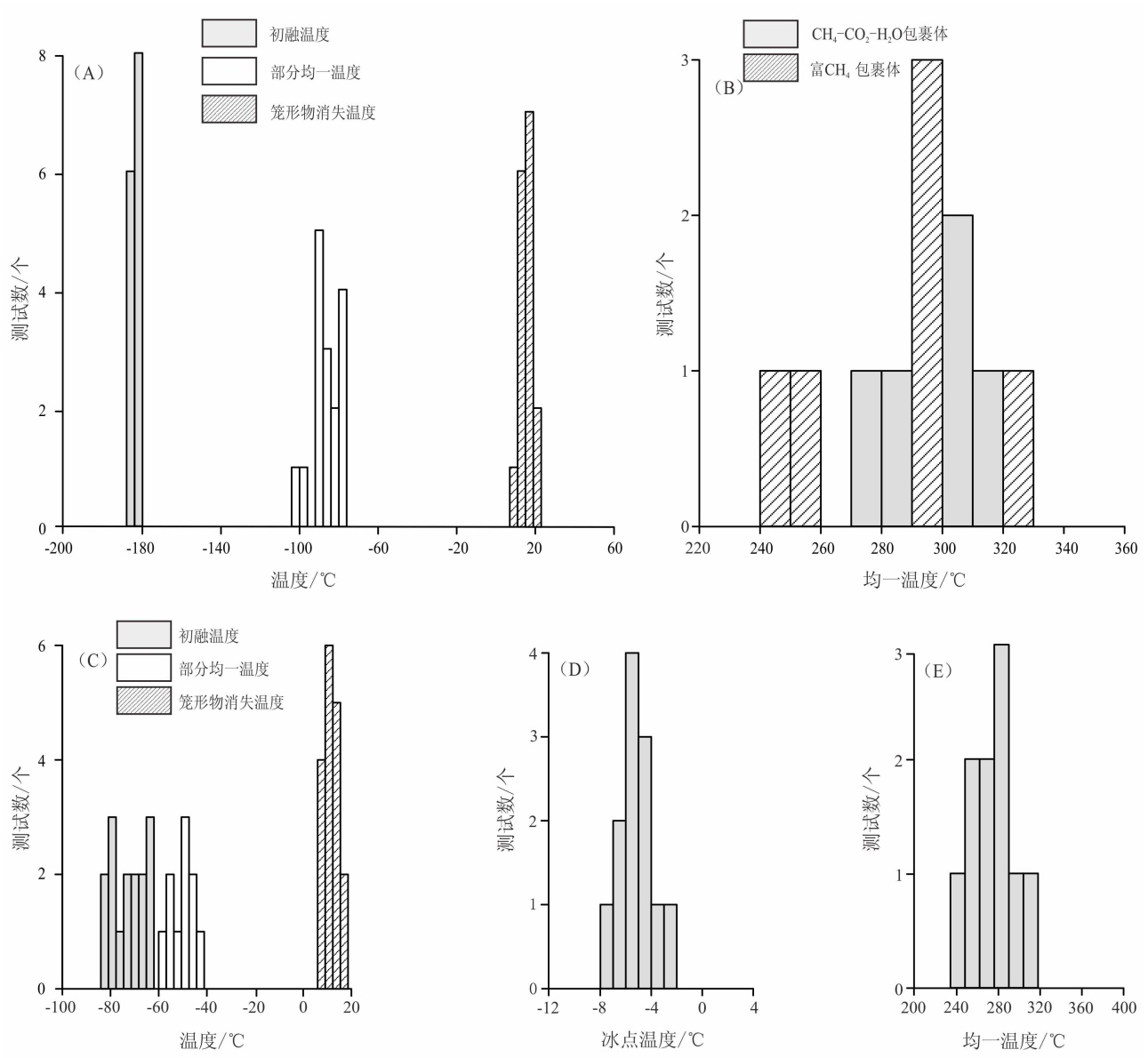


图 5　Ⅰ阶段包裹体测温数据直方图

Fig. 5　Histograms of thermometric measurements of fluid inclusions in stage Ⅰ

3.3.2　*多金属硫化物-石英阶段*

本阶段石英中主要发育 $CH_4-CO_2-H_2O$(VL) 及气液两相（L）包裹体，下面将对 2 种类型包裹体测温结果进行描述。

$CH_4-CO_2-H_2O$ 包裹体（VL）：室温下这类包裹体也是由 CH_4-CO_2 超临界液泡和水溶液组成。包裹体在降温至完全变为固体后，缓慢升温，固态成分融化温度依然较纯 CO_2 三相点略低，表明有 CH_4 的存在。继续升温，测得部分均一温度为 -8.4℃ ~ -41.7℃；笼形物消失温度的区间为 8.2℃ ~13.4℃（图 6A）；包裹体的完全均一温度为 206.7℃ ~331.1℃（图 6B）。均一温度主要从气液比 <50% 的包裹体中测得，绝大多数气液比 >50% 的此类包裹体在 231℃ ~300℃时就已爆裂。根据上述测温数据可以推测含碳相中甲烷的摩尔分数低于Ⅰ阶段甲烷的摩尔分数。

气液两相包裹体（L）：这类包裹体在此阶段中冰点温度为 -2.1℃ ~ -5.9℃（图 6C），对应盐度为 3.5% ~9.1 % NaCleqv，完全均一温度为 190℃ ~295.6℃（图 6D）。

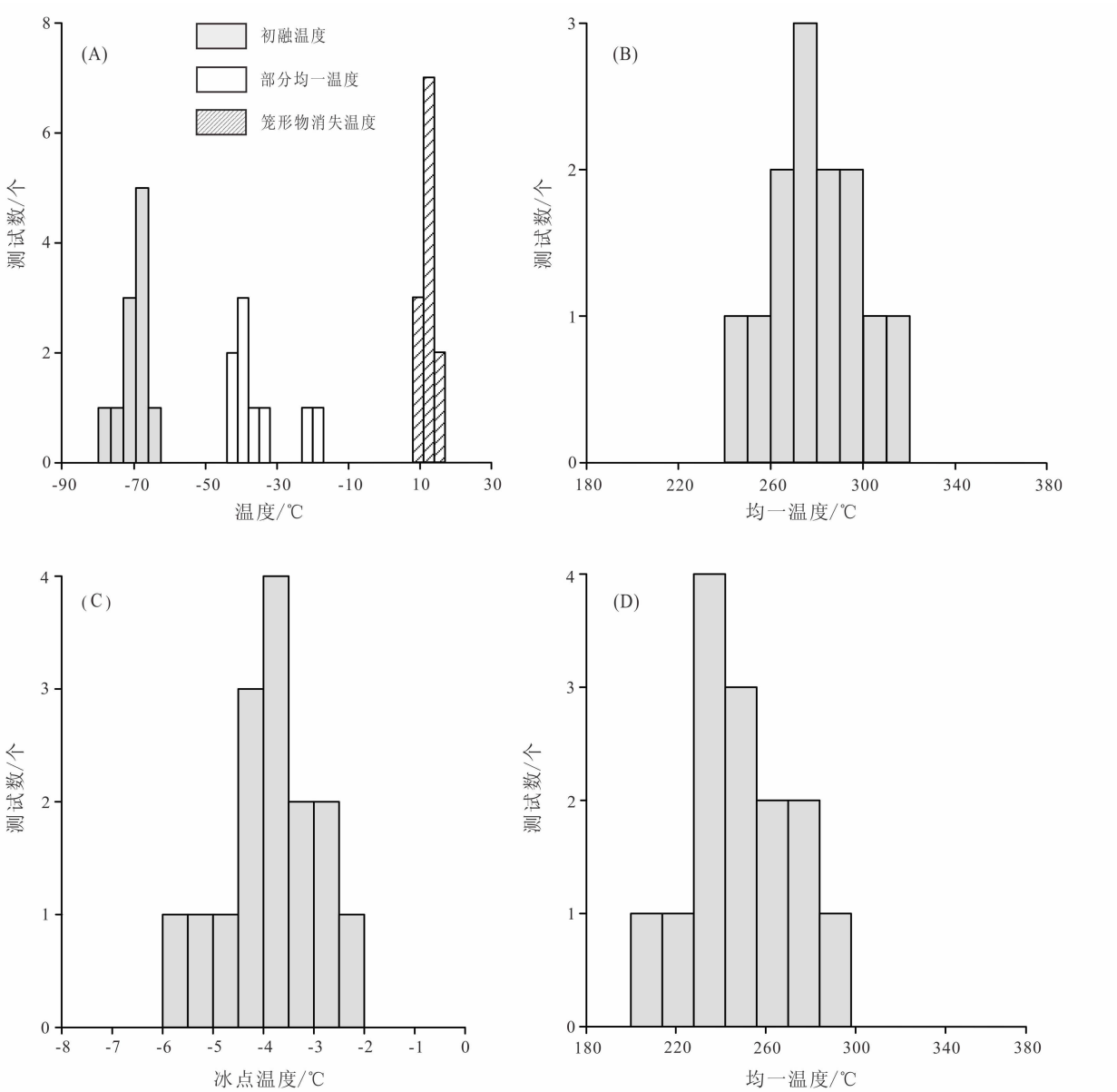


图 6 Ⅱ阶段包裹体测温数据直方图

Fig. 6 Histograms of thermometric measurements of fluid inclusions in stage Ⅱ

3.3.3 *石英-碳酸盐阶段*

本阶段石英中只含有气液两相（L）包裹体，其冰点温度为 -2.2℃ ~4.2℃，对应盐度为3.7% ~ 6.7 % NaCleqv，完全均一温度为 180℃ ~241℃，流体密度为 0.85 ~0.92 g/cm^3（图 7）。

3.4 激光拉曼分析

对矿区各成矿阶段流体包裹体进行了激光拉曼测试，结果表明各阶段包裹体的液相成分为 H_2O，但气相成分有所差异。Ⅰ阶段包裹体中主要气相成分为纯 CH_4；Ⅱ阶段包裹体气相成分为 CH_4、CO_2 以及 H_2O；Ⅲ阶段包裹体气相成分为 H_2O（图 8）。

4 稳定同位素研究

4.1 氢氧同位素特征

H、O 等稳定同位素，主要用于示踪成矿流体来源及其演化规律[21]。为探究铅锌矿床成矿流体来源，本文对各阶段石英样品进行 H、O 同位素分析，测试数据见表 2，绘制 $\delta^{18}O - \delta D$ 关系图（图 9）显示，Ⅰ阶段数据点分布在岩浆水范围内，Ⅱ、Ⅲ数据点向雨水线方向漂移。

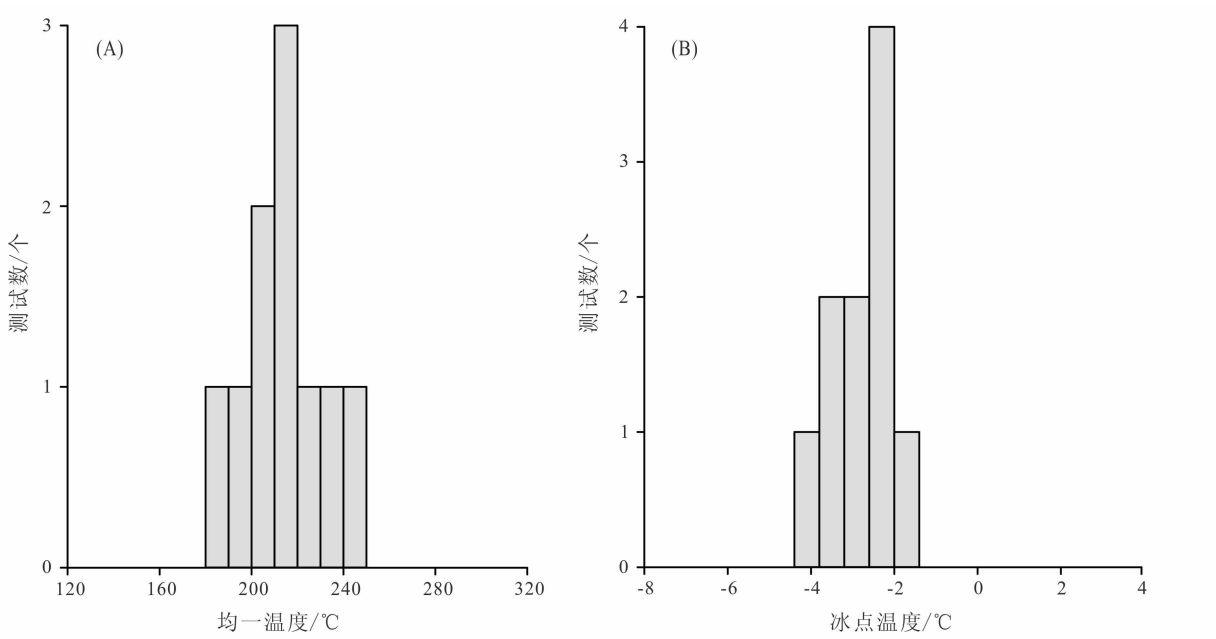


图 7　Ⅲ阶段包裹体测温数据直方图

Fig. 7　Histograms of thermometric measurements of fluid inclusions in stage Ⅲ

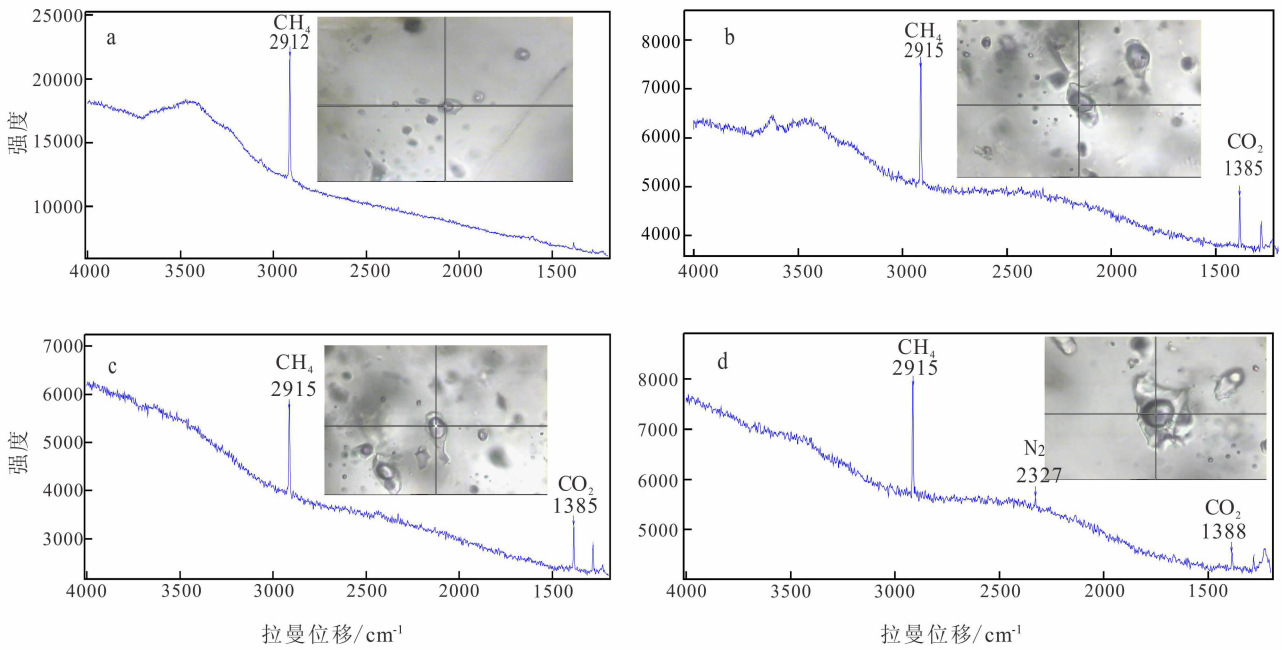


图 8　维拉斯托矿床流体包裹体激光拉曼图谱

Fig. 8　Laser Raman spectra of fluid inclusions in Weilasituo deposit

4.2　硫同位素特征

硫是铅、锌、铜等矿物良好的矿化剂，对于指示成矿物质来源具有重要意义[23]。$\delta^{34}S_{CDT}$有地幔硫、现代海水硫和沉积（还原）硫 3 种不同的来源，上地幔基性-超基性岩 $\delta^{34}S_{CDT}$值接近于 $0 \pm 3 \times 10^{-3}$；中酸性岩浆岩的 $\delta^{34}S_{CDT}$多介于 $-3.4 \times 10^{-3} \sim 26.7 \times 10^{-3}$之间；变质岩的 $\delta^{34}S_{CDT}$值分布范围较大，常见的正负值均可见于沉积岩[24]。通过对主

表 2 维拉斯托矿床成矿各阶段流体包裹体的氢氧同位素组成

Table 2 Oxygen and hydrogen isotope compositions of fluid inclusions in all phases of Weilasituo deposit

样品号	成矿阶段	测试矿物	$\delta^{18}O_{q-smow}/10^{-3}$	$\delta D_{H_2O-SMOW}/10^{-3}$	均一温度/℃	$\delta^{18}O_{H_2O-SMOW}/10^{-3}$	参考文献
1	Ⅰ	石英	14.0	-90.9	300	6.6	本文
2	Ⅰ	石英	14.4	-103.9	300	7.0	本文
3	Ⅱ	石英	14.1	-93.8	250	4.6	本文
4	Ⅱ	石英	11.8	-116.1	250	2.3	本文
5	Ⅱ	石英	14.9	-106.5	200~300	3.75	欧阳荷根，2013
6	Ⅱ	石英	14.3	-108.9	200~300	3.15	欧阳荷根，2013
7	Ⅱ	石英	13.0	-119.4	200~300	1.85	欧阳荷根，2013
8	Ⅱ	石英	14.2	-139.4	200~300	3.05	欧阳荷根，2013
9	Ⅱ	石英	12.3	-116.1	200~300	1.15	欧阳荷根，2013
10	Ⅱ	石英	13.6	-110.9	200~300	2.45	欧阳荷根，2013
11	Ⅱ	石英	16.3	-88.2	200~300	5.15	欧阳荷根，2013
12	Ⅱ	石英	12.0	-121.0	-	4.0	王瑾 等，2010
13	Ⅱ	石英	12.1	-105.0	-	4.1	王瑾 等，2010
14	Ⅱ	石英	12.0	-118.0	-	4.0	王瑾 等，2010
15	Ⅱ	石英	13.5	-114.0	-	5.5	王瑾 等，2010
16	Ⅱ	石英	12.5	-93.0	-	4.5	王瑾 等，2010
17	Ⅲ	石英	11.0	-105.8	200	-1.2	本文

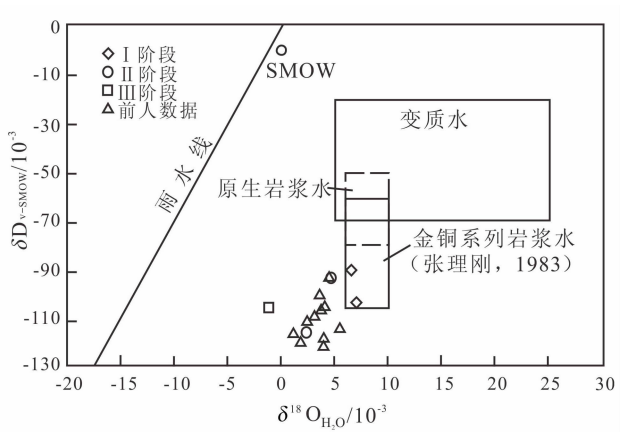


图 9 流体包裹体 $\delta^{18}O-\delta D$ 同位素图解[22]

Fig. 9 Hydrogen-oxygen isotope diagram of fluid inclusions

成矿阶段 16 件硫化物矿石样品进行的硫同位素分析（表 3），得到的成矿流体的平均硫同位素组成范围为 $-3.5\times10^{-3}\sim1.4\times10^{-3}$，平均值为 -0.28×10^{-3}。硫同位素具有典型的岩浆来源的特征。

表 3 维拉斯托铅锌矿床硫同位素数据表

Table 3 Sulfur isotope distribution of Weilasituo Pb-Zn deposit

样品号	测试矿物	分析结果 $\delta^{34}S_{CDT}/10^{-3}$
1	黄铁矿	0
2	黄铁矿	0.1
3	磁黄铁矿	1.6
4	磁黄铁矿	1.4
5	闪锌矿	-3.4
6	闪锌矿	-3.5
7	闪锌矿	-0.5
8	闪锌矿	-0.4
9	闪锌矿	-2.9
10	闪锌矿	-3.0
11	闪锌矿	-2.7
12	方铅矿	-0.6
13	方铅矿	-0.5
14	方铅矿	-0.5
15	方铅矿	-0.4
16	方铅矿	-2.8

5　讨论

5.1　成矿流体来源及性质

氢氧同位素研究是我们分析矿床流体来源及性质的一个重要手段，本文也以氢氧稳定同位素的数据对维拉斯托矿床流体进行讨论。

石英流体包裹体测温结果显示，维拉斯托矿床自早阶段到晚阶段流体包裹体类型以富液相包裹体为主，含有少量富 CH_4 包裹体以及含 CH_4-CO_2 的包裹体，均一温度和盐度逐渐降低，Ⅰ阶段均一温度范围为 243.1℃ ~ 398.5℃，盐度为 4.8% ~ 12%；Ⅱ阶段均一温度为 190℃ ~331.1℃，盐度为 3.5% ~9.1%；Ⅲ阶段均一温度范围为180℃ ~ 240℃，盐度范围为 3.7% ~6.7 % NaCleqv；并显示成矿流体具有中温、低盐度和低密度的特点。流体包裹体地球化学测试时选取样品的 $\delta D_{H_2O-SMOW}$ 值为 -90.9×10^{-3} ~ -116.1×10^{-3}，明显低于岩浆水的 δD 值（50×10^{-3} ~ 85×10^{-3}）[25]。根据公式计算的 $\delta^{18}O_{H_2O-SMOW}$ 的值为 -1.2×10^{-3} ~ 7.0×10^{-3} [14,26]。通过投图可知维拉斯托成矿的 3 个阶段的成矿流体 $\delta^{18}O_{H_2O-SMOW}$ 值逐渐降低，越是晚阶段越接近大气降水线，推断其成矿流体的演化趋势是受大气降水影响的结果，也可能受成矿温度的取值的影响[22]。上述分析结果表明维拉斯托矿床成矿流体是由岩浆水和大气降水 2 个组分组成的混合流体，早期以岩浆水为主，随着成矿作用的进行大气降水的作用逐渐变大，到晚期成矿流体变为以大气降水为主。

激光拉曼光谱测试数据表明该矿床流体包裹体中含有二氧化碳和甲烷。Ⅰ阶段和Ⅱ阶段中包含 CH_4 和 CO_2。维拉斯托矿床的成矿流体类似于其他位于大兴安岭南段西坡成矿带矿床的流体成分。流体中的有机质的混入可能是 δD 值变低的原因，有研究结果显示临近的拜仁达坝矿床碳同位素显示为典型的地层来源特征[7]。

5.2　矿床成因及成矿作用

综上所述，可以将维拉斯托铜铅锌多金属矿床成矿作用总结如下：早白垩世早期（135 Ma）受到蒙古—鄂霍茨克构造体系影响，本地区大规模中酸性岩浆活动发生时，成矿早期阶段富含金属元素的岩浆沿着断裂带提供的空间上涌，晚期混入了大气降水。大气降水的加入使得岩浆物化条件发生了变化，同时随着温度、压力的降低，成矿流体氧逸度、酸碱度和盐度也开始下降，不同金属矿物因溶解度的降低而逐渐开始沉淀，并在有利空间内富集成矿。

6　结论

（1）按照矿物组合及矿脉之间的穿切关系，可将维拉斯托矿床热液期划分为石英-黄铁矿-毒砂阶段（Ⅰ）、多金属硫化物-石英阶段（Ⅱ）及石英-碳酸盐阶段（Ⅲ）。

（2）Ⅰ阶段中发育 V、VL 和 L 型 3 种类型的包裹体，Ⅱ阶段中发育 VL 和 L 2 种类型的包裹体，Ⅲ阶段中主要发育单一的 L 型包裹体。测温结果表明，维拉斯托成矿流体属于中温、低盐度的还原性体系的流体。

（3）流体包裹体 H、O 同位素地球化学研究表明，维拉斯托铅锌多金属矿床成矿流体为岩浆水和大气降水的不混溶体系，早期主要为岩浆水，晚期有大气降水的混入。矿床 S 同位素表明，维拉斯托矿床成矿物质源于深部岩浆。

参考文献：

[1] 郭利军. 内蒙古自治区克什克腾旗维拉斯托矿区银铅锌多金属矿详查报告 [R]. 赤峰：内蒙古地质勘查有限责任公司，2007.
GUO Li-jun. Detailed survey report of Weilasituo Ag-Pb-Zn polymetallic deposit, Keshiketeng Region, Inner Mongolia [R]. Chifeng: Inner Mongolia Geological Exploration co., Ltd, 2007.

[2] 郑翻身，蔡红军，张振法. 内蒙古拜仁达坝维拉斯托超大型银铅锌矿的发现及找矿意义 [J]. 物探与化探，2006，30（1）：13-20.
ZHENG Fan-shen, CAI Hong-jun, ZHANG Zhen-fa. The discovery of superlarge silver-lead-zinc deposits in Bairendaba and Weilasituo, Inner Mongolia, and its ore-prospecting significance [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 30 (1): 13-20.

[3] 江思宏，聂凤军，刘翼飞，等. 内蒙古拜仁达坝及维拉斯托银多金属矿床的硫和铅同位素研究 [J]. 矿床地质，2010，29（1）：101-112.
JIANG Si-hong, NIE Feng-jun, LIU Yi-fei, et al. Sulfur and lead isotopic compositions of Bairendaba and Weilasituo silver-polymetallic deposits, Inner Mongolia [J].

Mineral Deposits, 2010, 29 (1): 101-112.

[4] 梅微, 吕新彪, 唐然坤, 等. 大兴安岭南段西坡拜仁达坝—维拉斯托矿床成矿流体特征及其演化 [J]. 地球科学, 2015 (1): 145-162.
MEI Wei, LÜ Xin-biao, TANG Ran-kun, et al. Ore-forming fluid and its evolution of Bairendaba-Weilasituo deposits in west slope of Southern Great Xing'an Range [J]. Earth Science, 2015 (1): 145-162.

[5] 王瑾, 侯青叶, 陈岳龙, 等. 内蒙古维拉斯托铜多金属矿床流体包裹体研究 [J]. 现代地质, 2010, 24 (5): 847-855.
WANG Jin, HOU Qing-ye, CHEN Yue-long, et al. Fluid inclusion study of the Weilasituo Cu polymetal deposit in Inner Mongolia [J]. Geoscience, 2010, 24 (5): 847-855.

[6] 刘翼飞, 樊志勇, 蒋胡灿, 等. 内蒙古维拉斯托-拜仁达坝斑岩-热液脉状成矿体系研究 [J]. 地质学报, 2014, 88 (12): 2373-2385.
LIU Yi-fei, FAN Zhi-yong, JIANG Hu-can, et al. Genesis of the Weilasituo-Bairendaba porphyry-hydrothermal vein type system in Inner Mongolia, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88 (12): 2373-2385.

[7] Ouyang H G, Mao J W, Santosh M. Anatomy of a large Ag-Pb-Zn deposit in the Great Xing'an Range, northeast China: metallogeny associated with Early Cretaceous magmatism [J]. International Geology Review, 2013, 55 (4): 411-429.

[8] 欧阳荷根. 大兴安岭南段拜仁达坝—维拉斯托银多金属矿床成矿作用及动力学背景: 博士学位论文 [D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
OUYANG He-gen. Metallogenesis of Barendaba-Weilasituo silver-polymetallic deposit and its geodynamic setting, in the southern segment of Great Xing'an Range, NE China: doctor's degree thesis [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.

[9] 潘小菲, 郭利军, 王硕, 等. 内蒙古维拉斯托铜锌矿床的白云母 Ar-Ar 年龄探讨 [J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28 (5): 473-479.
PAN Xiao-fei, GUO Li-jun, WANG Shuo, et al. Laser microprobe Ar-Ar dating of biotite from the Weilasituo Cu-Zn polymetallic deposit in Inner Mongollia [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2009, 28 (5): 473-479.

[10] 邵济安, 牟保磊, 朱慧忠, 等. 大兴安岭中南段中生代成矿物质的深部来源与背景 [J]. 岩石学报, 2010, 26 (3): 649-656.
SHAO Ji-an, MOU Bao-lei, ZHU Hui-zhong, et al. Material source and tectonic settings of the Mesozoic mineralization of the DaHinggan Mts [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26 (3): 649-656.

[11] 赵一鸣, 张德全. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价 [M]. 北京: 地震出版社, 1997: 131-135.
ZHAO Yi-ming, ZHANG De-quan. Metallogeny and prospective evaluation of copper-polymetallic deposits in the Da Hinggan mountains and its adjacent regions [M]. Beijing: Seismological Press, 1997: 131-135.

[12] 盛继福, 付先政, 李鹤年. 大兴安岭中段成矿环境与铜多金属矿床地质特征 [M]. 北京: 地震出版社, 1999: 90-125.
SHENG Ji-fu, FU Xian-zheng, LI He-nian. Metallogenic environment and copper polymetallic ore deposit geological characteristics of middle Greater Hinggan mountains [M]. Beijing: Seismological Press, 1999: 90-125.

[13] 李蒙文. 天山—兴蒙造山带中段内生金属矿床成矿系列及成矿预测: 博士学位论文 [D]. 北京: 中国地质科院, 2006.
LI Meng-wen. Research on metallogenic series and metallogenic prognosis of endogenetic metallic deposits in the middle section of Tianshan-Xingmeng Orogen: doctor's degree thesis [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2006.

[14] Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water [J]. Journal of geophysical research, 1972, 77 (17): 3057-3067.

[15] Roedder E. Fluid inclusions [J]. Mineralogical Society of America, 1984, 12: 644.

[16] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-450.
LU Huan-zhang, FAN Hong-rui, NI Pei, et al. Fluid inclusions [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-450.

[17] 范宏瑞, Groves D I, Mikucki E J, 等. 西澳大利亚纳沃日金矿流体混合与金的成矿作用 [J]. 矿床地质, 2001, 20 (1): 37-43.
FAN Hong-rui, Groves D I, Mikucki E J, et al. Fluid mixing in the generation of Nevoria Gold mineralisation in the Southern Cross Greenstone Belt, Western Austral-

ia [J]. Mineral Deposits, 2001, 20 (1): 37-43.

[18] Thiery R, Vidal J, Dubessy J. Phase equilibria modelling applied to fluid inclusions: liquid-vapor equilibria and calculation of the molar volume in the CO_2 CH_4 N_2, system [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1994, 58 (3): 1073-1082.

[19] 王秋玲, 孙洪涛, 丁俊英, 等. 塔里木北缘库鲁克塔格地块大金沟金矿流体包裹体特征：对矿床成因的启示 [J]. 世界地质, 2016, 35 (3): 771-777.
WANG Qiu-ling, SUN Hong-tao, DING Jun-ying, et al. Fluid inclusions for Dajingou gold deposit of Quruqtagh block in northeastern Tarim: implication for ore genesis [J]. Global Geology, 2016, 35 (3): 771-777.

[20] 魏占浩, 杜生鹏, 王键, 等. 青海青龙沟金矿成矿流体演化特征及矿床成因研究 [J]. 世界地质, 2015, 34 (4): 951-960.
WEI Zhan-hao, DU Sheng-peng, WANG Jian, et al. Evolution characteristics of fluid and genesis of Qinglonggou gold deposit in Qinghai [J]. Global Geology, 2015, 34 (4): 951-960.

[21] 郑永飞. 稳定同位素地球化学 [M]. 北京：科学出版社, 2000: 1-315.
ZHENG Yong-fei. Stable isotope geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-315.

[22] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用 [M]. 西安：陕西科学技术出版社, 1985: 91-94.
ZHANG Li-gang. The application of stable isotope to geology [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1985: 91-94.

[23] 陈永清, 黄静宁, 卢映祥, 等. 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 [J]. 地球科学, 2009, 34 (4): 585-594.
CHEN Yong-qing, HUANG Jing-ning, LU Ying-xiang, et al. Geochemistry of elements, sulphur-lead isotopes and fluid inclusions from Jinla Pb-Zn-Ag poly-metallic ore field at joint area across China and Myanmar Border [J]. Earth Science, 2009, 34 (4): 585-594.

[24] 陕亮, 郑有业, 许荣科, 等. 硫同位素示踪与热液成矿作用研究 [J]. 地质与资源, 2009, 18 (3): 197-203.
SHAN Liang, ZHENG You-ye, XU Rong-ke, et al. Review on sulfur isotopic tracing and hydrothermal metallogenesis [J]. Geology and Resources, 2009, 18 (3): 197-203.

[25] Taylor H P, Jr H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposits [J]. Economic Geology, 1974, 69 (6): 843-883.

[26] 王春光, 孙丰月, 孙国胜, 等. 内蒙古翁牛特旗荷尔勿苏铅锌矿床成矿流体性质与成因 [J]. 世界地质, 2016, 35 (2): 450-457, 469.
WANG Chun-guang, SUN Feng-yue, SUN Guo-sheng, et al. Characteristics and genesis of ore-forming fluid in Heerwusu Pb-Zn deposit of Wengniute banner, Inner Mongolia [J]. Global Geology, 2016, 35 (2): 450-457, 469.