

河南省洛宁县寨凹钼矿床流体包裹体研究 及矿床成因

邓小华¹ 陈衍景^{1,2} 姚军明² 李文博¹ 李 诺¹

王 运¹ 糜 梅² 张 颖²

(1. 北京大学 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;

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

摘要:寨凹钼矿床位于华北克拉通南缘的熊耳地体, 矿床定位受马超营断裂带的次级断裂控制, 矿体呈脉状赋存于太华超群石板沟组黑云角闪斜长片麻岩中。成矿过程包括 3 个阶段: 石英-辉钼矿阶段(I)、石英-多金属硫化物阶段(II)、石英-碳酸盐阶段(III), 其中, I 阶段为主成矿阶段。寨凹钼矿床可见 2 类流体包裹体, 即水溶液型和含子晶包裹体; 激光拉曼指示包裹体成分主要为 H₂O。从早到晚, 流体包裹体均一温度从 I 阶段 100~260℃, 经 II 阶段 110~160℃, 变化为 III 阶段 120~180℃, 矿床总体属于低温热液矿床; 流体包裹体盐度从 I 阶段的 2~25 wt%NaCl_{eqv} 演化至 II 阶段的 6~30 wt%NaCl_{eqv}, 然后降为 III 阶段的 7~25 wt%NaCl_{eqv}。I 阶段均一温度范围宽广、流体包裹体盐度由双峰式演化为单峰式以及包裹体温度-盐度双变图的负相关性指示了流体混合是主要的成矿机制。寨凹钼矿床流体包裹体以高密度、高盐度的低温低压流体为特征, 是含 CaCl₂ 流体参与成矿的结果, 热的岩浆流体与冷的含 CaCl₂ 的卤水的混合, 导致了辉钼矿的沉淀。寨凹钼矿床地质和流体包裹体特征与侵入岩相关的成矿系统一致, 指示其成因类型为与侵入岩有关的钼矿床。

关键词:寨凹钼矿床; 矿床地质; 流体包裹体; 侵入岩有关的钼矿; 东秦岭造山带

中图分类号: P618.65 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2008)06-1250-17

1 前 言

东秦岭钼矿带位于华北克拉通南缘, 南北分别以商丹断裂和三宝断裂为界, 蕴含了栾川、金堆城、东沟等超大型钼矿床和众多中小型钼矿床, 其资源储量超过 500 万 t, 是中国最重要的钼矿带^[1]。其矿化类型包括斑岩型、斑岩-夕卡岩型以及碳酸岩脉型, 主要形成于两个时代: 160~110 Ma 和 220 Ma 左右^[1-9], 指示了东秦岭大规模成矿事件主要发生在燕山期和印支期。该地区最新发现了一批脉状钼矿床, 如洛宁寨凹、嵩县纸房、方城土门、内乡太平镇以及灵宝大湖^[8, 10-14], 虽然纸房钼矿与大湖钼矿已被厘定为造山型, 但大部

分脉状矿床的成因归属和成矿时代尚不清楚, 需要进一步研究。

洛宁寨凹钼矿产于著名的脉状造山型金-银矿田所在地——熊耳地体(图 1), 其地质背景和矿床地质特征与熊耳地体的上宫金矿^[10, 15-18]、铁炉坪银矿^[19-20]等典型造山型矿床极其相似, 都属于断控脉状矿床, 陈衍景^[10]推测其成因类型可能为造山型。而在寨凹地区, 马超营断裂以北依次发育银多金属矿、铜矿和钼矿, 指示沿马超营断裂向东北方向的成矿元素从低温到高温的分带现象(图 1), 似乎与地壳连续模式以及碰撞造山作用的 CMF 模式^[10]相对应。寨凹钼矿床地质特征与熊耳地体其他造山型矿床相似,

收稿日期: 2008-11-10; 改回日期: 2008-11-15

基金项目: 国家“973”项目(2006CB403508)和国家自然科学基金项目(40425006, 40730421, 40872067)资助。

作者简介: 邓小华, 男, 1984 年生, 博士生, 矿床学专业; E-mail: dxh198411@126.com。

通讯作者: 陈衍景, Email: yjchen@pku.edu.cn; gigyjchen@126.com。

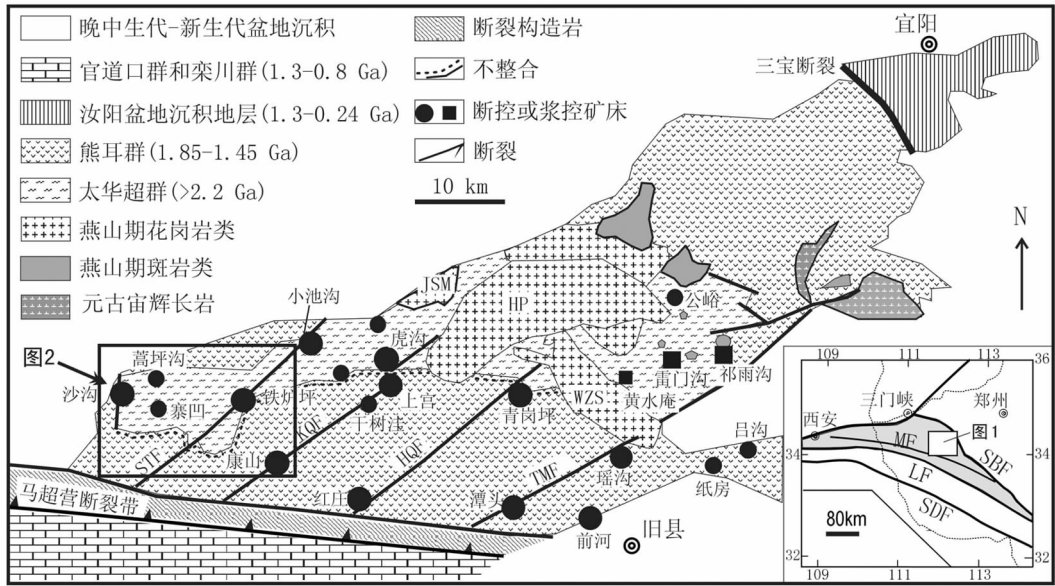


图 1 熊耳地体地质和矿床分布图^[10]

WZS—五丈山花岗岩体;HP—嵩坪花岗岩体;JSM—金山庙花岗岩体;
STF—三门—铁炉坪断裂;KQF—康山—七里坪断裂;HQF—红庄—青岗坪断裂;TMF—陶村—马园断裂;
SBF—三宝断裂;SDF—商丹断裂;MF—马超营断裂;LF—栾川断裂

Fig.1 The map showing the geology and ore deposits distribution of the Xiong'er terrane^[10]

WZS—Wuzhangshan granite; HP—Haoping granite;JSM—Jinshanmiao granite
STF—Sanmen-Tieluping fault; KQF—Kangshan-Qiliping fault;HQF—Hongzhuang-Qinggangping fault;
TMF—Taocun-Mayuan fault;SBF—San-Bao fault;SDF—Shang-Dan fault;MF—Machaoying fault; LF—Luanchuan fault

那么,其成因类型是否也是造山型呢?

寨凹钼矿的辉钼矿 Re—Os 年龄为(1762±31) Ma (作者待发表),指示其为中元古代成矿事件,寨凹地区广泛分布的熊耳群火山岩最新的锆石 SHRIMP 年龄为 1.80~1.75 Ga^[21],说明寨凹钼矿的形成与熊耳群有着紧密的时空联系,那么,寨凹钼矿是否与熊耳群火山岩有关呢?其成因类型的厘定显得紧迫而必要。

矿床地质,尤其是矿体产状、矿石组构、矿物组合和流体包裹体类型及其组合,是厘定矿床类型的根本性依据^[22-23],而流体包裹体则被共识为判断与侵入岩有关的矿床的重要依据^[23-24]。因此,笔者在详细的矿床地质研究基础上,利用冷热台和激光拉曼光谱分析技术,系统研究了寨凹钼矿的流体包裹体热力学和成分特征,探讨了流体演化过程,确证寨凹钼矿是侵入岩有关的钼矿床。

2 区域地质

河南寨凹钼矿床产于东秦岭钼矿带^[1,10],大地构造上隶属华北克拉通南缘的熊耳地体(图 1)。据研究^[25],

熊耳地体的地质演化经历了 3 个巨型旋回:(1) 1.85 Ga 以前的早前寒武纪结晶基底形成,(2)中元古代到古生代的大陆边缘增生,(3)华北与扬子板块的陆陆碰撞(早中生代)及碰撞后(晚中生代至今)构造作用;熊耳地体东西两侧分别为伊川—潭头盆地和洛宁—卢氏断陷盆地,北界沿三宝断裂推覆到嵩箕地块的中元古界—三叠系盖层之上,南界是马超营断裂带。

熊耳地体的主要岩石地层单元为变质基底太华超群和盖层熊耳群(图 1)。太华超群主要岩性为斜长角闪岩、角闪片麻岩、黑云斜长片麻岩、大理岩、石墨片麻岩以及混合片麻岩、条带状混合岩等,形成于 3.0~2.2 Ga^[26-27]。熊耳群火山岩主要由玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩和流纹岩组成,其比例约为 4:11:48:27:10^[28],同位素年龄(含锆石 SHRIMP 年龄)为 1.80~1.75 Ga^[21],是华熊地块乃至整个华北克拉通最下部的盖层^[2,25,28-31]。熊耳群火山岩是古宽坪洋壳沿栾川断裂向北俯冲到华熊地块之下而诱发的弧岩浆作用的结果^[2,25,28];也有学者解释为裂谷作用^[29]或

地幔柱作用^[31]的产物。熊耳地体断裂构造发育,NE向断裂最醒目,近等距排列(图1),总体属于东西向马超营断裂的次级构造。马超营断裂长200 km,可追溯到1.4 Ga以前^[2],在扬子与华北板块碰撞期间,马超营断裂带被解释为倾向北A型俯冲带^[19,25,32-33]或指向南的厚皮推覆构造带^[34]。熊耳地体发育大量燕山期花岗岩类,五丈山、蒿坪、金山庙等大型花岗岩基主要分布在中部,合称花山杂岩;花山杂岩以北发育较多燕山期小型斑岩体和爆破角砾岩筒,并蕴涵金、钼等矿床,如雷门沟斑岩钼矿和祁雨沟爆破角砾

岩筒型金矿^[35-36];花山杂岩以南则发育大量断裂构造控制的金/银矿床。这些花岗岩类和矿床均被解释为扬子与华北陆块之间碰撞造山及其后续造山带伸展垮塌过程的产物^[37]。

3 矿床地质

寨凹钼矿位于熊耳地体西南部的寨凹地区(图2),主要岩石地层单元为变质基底太华超群和盖层熊耳群,以及少量白垩系沉积物。断裂构造发育,走向主要为北北东和北西,可见北北东向的三门—铁

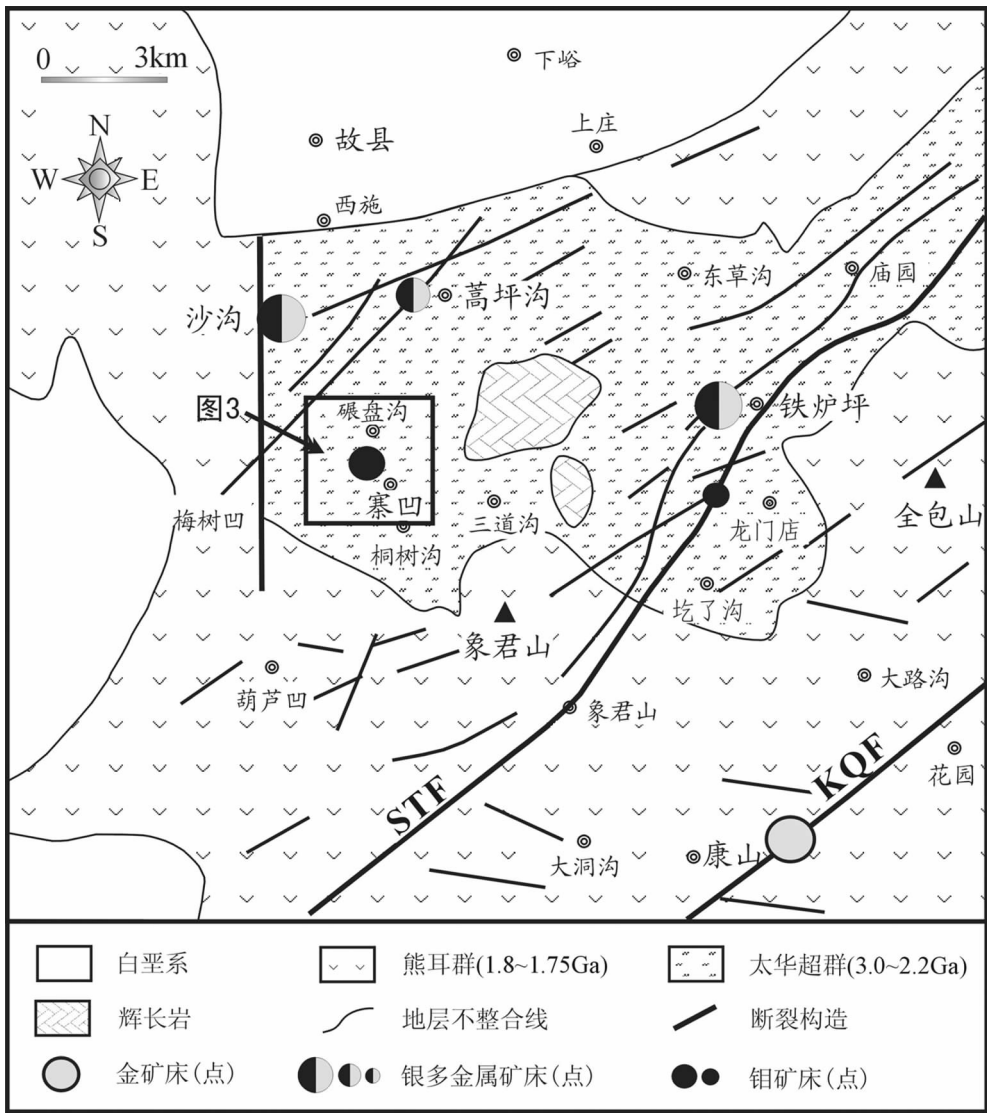


图2 寨凹地区地质和矿床分布图^[38-40]

STF—三门—铁炉坪断裂;KQF—康山—七里坪断裂

Fig. 2 The map showing the geology and ore deposits distribution of the Zhaiwa area^[38-40]

STF—Sanmen—Tieluping fault;KQF—Kangshan—Qiliping fault

炉坪(STF)断裂、康山—七里坪断裂(KQF)等马超营断裂的次级断裂,以及 STF、KQF 的更次级小断裂。本区岩浆岩发育,除了辉绿岩脉,地球物理资料显示,寨凹地区具有低重力、弱磁性的特征指示隐伏的中酸性侵入岩体的存在^[38-40](图 3-A)。

寨凹钼矿床位于河南洛宁县与卢氏县的交界,其地理坐标为东经 111°16'55",北纬 34°08'47"。寨凹钼矿赋矿地层为太华超群石板沟组,岩性为黑云角闪斜长片麻岩,少量黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、混合岩化片麻岩,局部夹角闪岩团块,产状为 115°<30°。地球物理和遥感资料显示,矿区深部存在隐伏的花岗斑岩体^[38-40]以及辉绿岩和细晶岩等(图 3-A)。钼矿体为受区域性脆韧性剪切带控制的脉状矿体(图 3-B,4-A),矿脉走向主要为北东东,倾向为北西,倾角较陡,为 58~80°(图 3-B)。沿剪切带发育含石英脉,厚度可达数十米,延伸长,品位最高可达 0.57%。

原生矿石可划分为石英脉型(图 4-B)及构造蚀变岩型(图 4-C)两类。钼矿物主要为辉钼矿,其赋存方式主要有两种:一是呈自形—半自形粒状、叶片状、团块状赋存于石英脉中;二是呈浸染状、薄膜状赋存于围岩表面或石英脉与围岩接触面上;镜下呈叶片状(图 4-F)或鳞片状(图 4-E)。其他金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿、方黄铜矿等。脉石矿物主要有石英、萤石、斜长石、白云母、方解石、绿泥石等。矿石构造包括块状、脉状、网脉状、条带状、角砾状、浸染状等构造。矿石结构包括粒状结构、叶片状、针状、长柱状结构、交代结构、充填结构、共结边结构、固溶体分离结构等。

围岩蚀变主要有硅化、碳酸盐化、绢云母化、绿泥石化、萤石化等。

根据矿脉穿插关系、矿石结构、矿物组合等,将成矿过程划分为 3 个阶段(图 4~5):石英—辉钼矿阶段(I)、石英—多金属硫化物阶段(II)、石英—碳酸盐阶段(III)。I 阶段矿物组合为石英—辉钼矿,呈脉状充填在围岩中,石英颗粒粗大,表面粗糙,遭受构造应力而破碎、变形,具明显波状消光现象,此阶段为主要的钼成矿阶段;II 阶段可细分为两个亚阶段,石英—黄铁矿—闪锌矿阶段(IIa)和石英—黄铜矿阶段(IIb),矿物组合分别为石英—粗粒黄铁矿—闪锌矿—辉钼矿和石英—黄铜矿—黄铁矿—辉钼矿,此阶段矿化组合复杂,但钼矿化较弱,不属于钼主成矿阶

段;III 阶段发育石英—碳酸盐细脉,几乎没有矿化。

4 流体包裹体研究

4.1 样品与测试

68 件研究样品主要采自李家沟矿脉和碾盘沟矿脉的采矿坑道和矿石堆,样品较新鲜。通过包裹体岩相学观察,遴选了其中适合进一步做冷热台和激光拉曼光谱分析的包裹体片(个大,最好>10 μm;数量多;相界限清楚)作为研究对象。石英—辉钼矿阶段(I)8 件,石英—多金属硫化物阶段(II)4 件以及石英—碳酸盐阶段(III)3 件,对其中的石英、萤石、方解石等透明矿物进行流体包裹体研究。

流体包裹体显微测温分析在中国科学院地质与地球物理研究所运用 LINKAM THMSG 600 型冷热台完成,温度范围为-196℃~+600℃,利用美国 FLUID INC 公司提供的人工合成流体包裹体样品对冷热台进行温度标定。流体包裹体测试过程中,开始时升或降温速度为 10~20℃/min,相变点附近速度降至 0.2~0.5℃/min。

流体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,所用仪器为 Renishaw RW-1000 型激光拉曼光谱仪,光源为 514.5 nm 的 Ar 原子激光器,计数时间为 20 s,每 1cm⁻¹(波数)计数一次,100~4000 cm⁻¹ 全波段一次取峰,激光束斑约 1 μm。

根据冷热台试验测得的 H₂O—NaCl—CaCl₂ 溶液包裹体的冰点温度(T_m),利用 Chi et al^[41]提供的方程和程序,可获得 H₂O—NaCl—CaCl₂ 溶液包裹体的盐度。根据冷热台试验测得的含子晶三相包裹体的子晶熔化温度(T_m,NaCl),利用 Hall et al^[42]提供的方程,可获得含子晶三相包裹体的盐度。

4.2 岩相学和包裹体类型

根据室温下(21℃)流体包裹体的岩相学特征、升温或降温过程中(-196~+600℃)的相变行为以及激光拉曼光谱分析,将包裹体分为水溶液型和含子晶型 2 类,各阶段流体包裹体特征及组合如下:

石英—辉钼矿阶段(I)的石英和萤石中发育上述 2 类包裹体,以水溶液型为主,含子晶型包裹体为次。其中,水溶液型包裹体呈孤立分布,为椭圆和不规则状,大小为 5~25 μm,以 10~20 μm 居多,气液比变化于 8%~40%,以 10%~20%居多;含子晶型包裹体呈孤立分布,为椭圆和不规则状,大小为 10~16

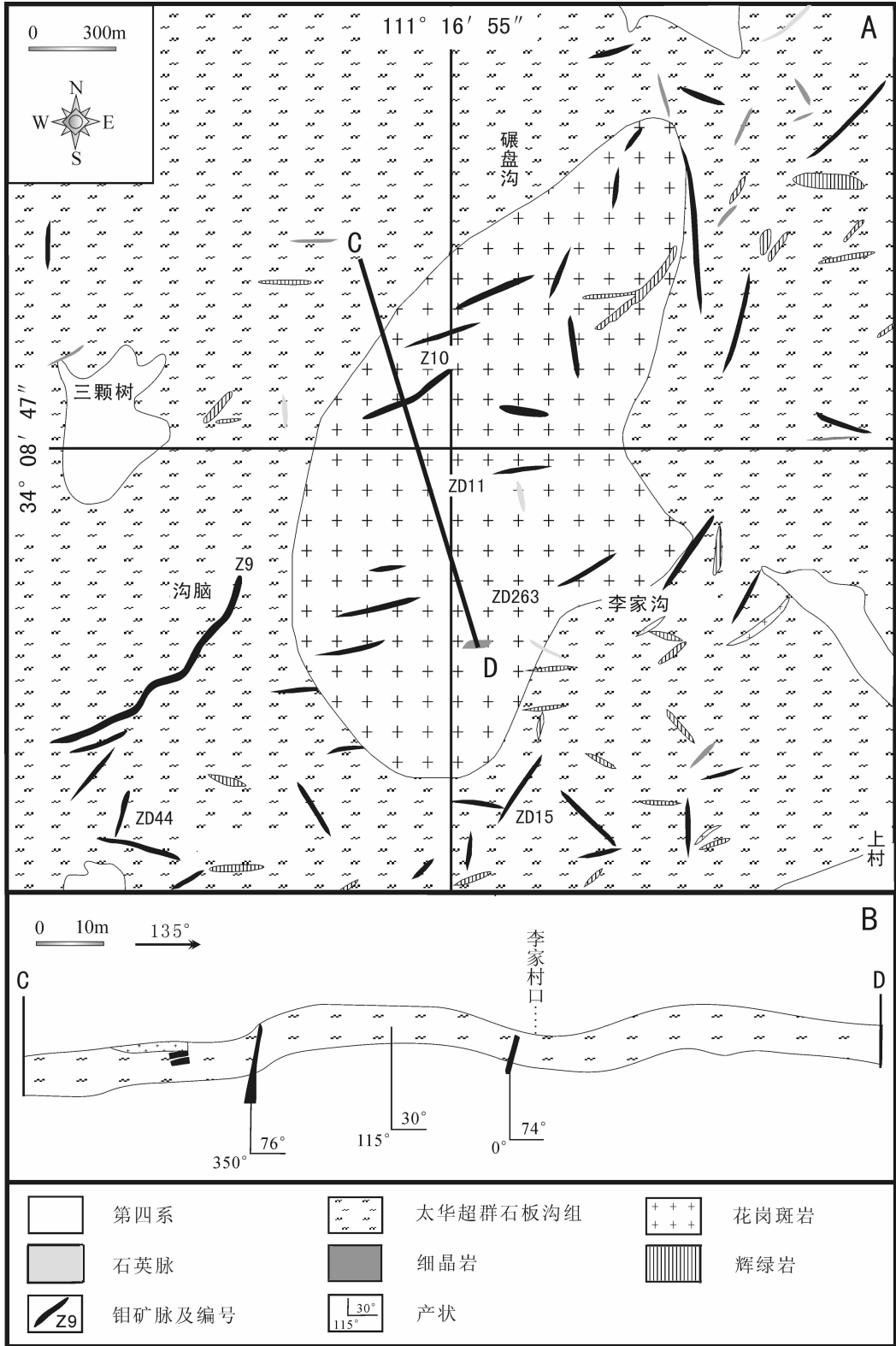


图3 寨凹钼矿床高磁异常解释图

A-矿床地质略图;B-碾盘沟第02号勘探线剖面图

Fig.3 The map showing high magnetic anomaly explanation for Zhaiwa molybdenum deposit
 A-showing the geology of the ore camp;B-showing the geological profile No.02 of the Niandangou Mo deposit

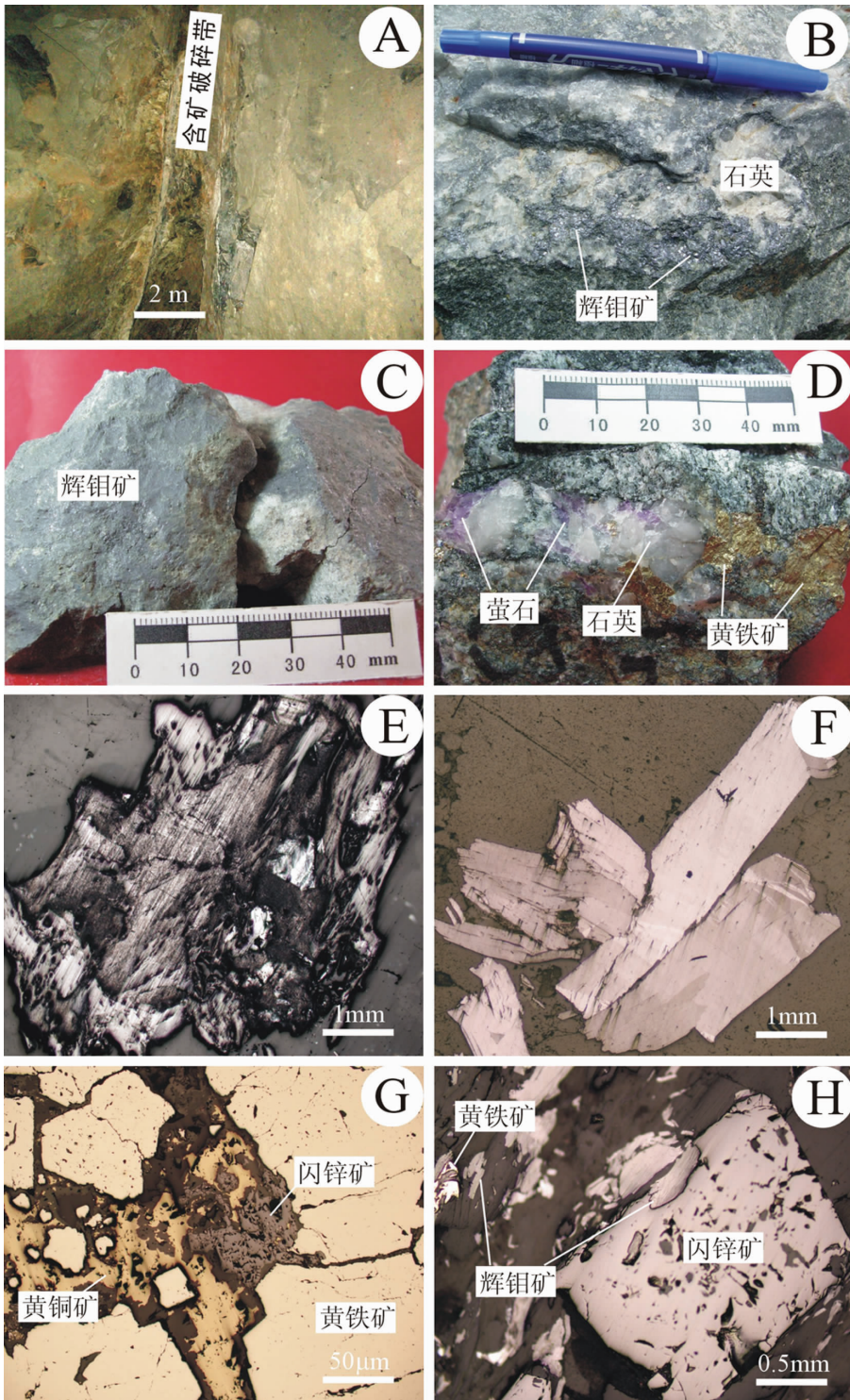


图 4 寨凹钼矿矿床地质特征图

A—产于蚀变破碎带的含矿石英脉；B—石英—辉钼矿脉穿切围岩，构成石英脉型钼矿石；C—蚀变岩型钼矿石；
 D—石英—萤石—粗粒黄铁矿脉；E—鳞片状辉钼矿；F—叶片状辉钼矿；G—石英—硫化物阶段，黄铜矿和闪锌矿充填
 在黄铁矿裂隙中；H—石英—硫化物阶段，黄铁矿、自形闪锌矿被辉钼矿穿插

Fig.4 Geological characteristics of the Zhaiwa Mo deposit

A—Mo-bearing quartz vein hosted in altered fracture zone; B—the wall rock have cut by quartz-molybdenite vein, which
 formed quartz-vein type ore; C—alteration rock type ore; D—quartz-fluorite-pyrite vein; E-lepidosome molybdenites;

F-flake molybdenites; G-quartz-sulfides stage, chalcopyrite and sphalerite filled into fissure of pyrite;

H-quartz-sulfides stage, pyrite and sphalerite cut by molybdenite

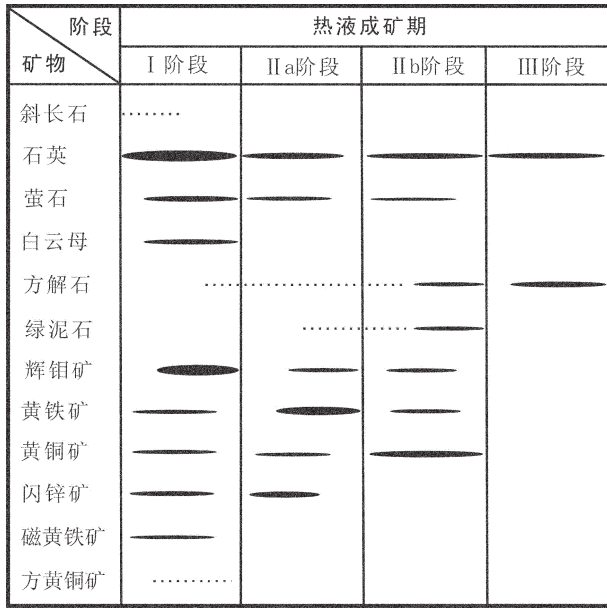


图 5 寨凹钼矿热液矿物共生组合与形成顺序
Fig.5 Paragenetic assemblage and sequence of hydrothermal minerals in the Zhaiwa Mo deposit

μm, 气液比变化于 8%~15%, 其子晶为立方体状、椭圆状、长板状等, 主要为石盐、钾盐以及石膏。

石英-多金属硫化物阶段(II)的石英和萤石中也发育 2 类包裹体, 以水溶液型为主, 含子晶型包裹体为次。其中, 水溶液型包裹体呈孤立分布, 为椭圆状、负晶形和不规则状, 大小为~25 μm, 以 8~15 μm 居多, 气液比变化于 7%~50%, 以 10%~20% 居多; 含子晶型包裹体呈孤立分布, 为椭圆和不规则状, 大小 8~20 μm, 气液比变化于 10%~30%, 其子晶为立方体状和椭圆状, 主要为石盐和钾盐。

石英-碳酸盐阶段(III)的石英和方解石中的流体包裹体较少, 且全部为水溶液型, 形态以椭圆状为主, 大小为 4~12 μm, 气液比为 10%~20%。

4.3 均一温度和盐度

各阶段流体包裹体测温结果列于表 1, 现分述如下:

石英-辉钼矿阶段(I), 以水溶液型包裹体为主, 含子晶型为次。其中, 水溶液型包裹体冷冻至-100℃以下液相全冻, 开始回温; 在-45~-38℃时盐的水合物开始熔化, 即初熔温度, 这明显低于 NaCl-H₂O 体系的共结温度 (-20.8℃), 但接近于 H₂O-NaCl-CaCl₂ 体系的共结温度(-52℃), 指示成矿流体以含 CaCl₂ 溶液为特征; 继续回温, 测得冰点温度为-27~-1.4℃, 大量低于共结温度(-20.8℃)的冰点温度的存在, 也指示成矿流体体系为 H₂O-NaCl-CaCl₂ 体系, 据此, 可计算出相应盐度为 2.41~24.91wt%NaCl.eqv, 说明盐度较高, 且 NaCl/(NaCl+CaCl₂) 为 0.48~1; 继续升温, 包裹体向液相均一, 其均一温度为 100~253℃。含子晶型包裹体的子晶呈立方体状、椭圆状、长板状等, 主要为石盐、钾盐以及硬石膏; 包裹体均一成液相, 均一温度为 141~182℃; 包裹体均一后, 子晶 500℃时仍未熔化, 说明其盐度高达 59.76 wt %NaCl.eqv。

石英-黄铁矿-闪锌矿阶段(II a), 以水溶液型包裹体为主, 含子晶型为次。其中, 水溶液型包裹体冷冻至-100℃以下液相全冻, 开始回温, 测得冰点温度为-24.2~-3.84℃, 大量低于共结温度(-20.8℃)的冰点温度的存在, 也指示成矿流体体系为 H₂O-NaCl-CaCl₂ 体系, 据此, 可计算出相应盐度为 (6.16~24.08)wt%NaCl.eqv, 且 NaCl/(NaCl+CaCl₂) 为

表 1 寨凹钼矿床显微测温结果

Table 1 Microthermometric data of the Zhaiwa molybdenum deposit

阶段	寄主矿物	包裹体类型	N	T _{in} /°C	T _{mice} /°C	T _{m, NaCl} /°C	T _h /°C	X _{NaCl}	盐度
I	石英和萤石	水溶液型	96	-45~-38	-27~-1.4		100~253	0.48~1	2.41~24.91
		含子晶型	8			>500	141~182		>59.76
IIa	石英和萤石	水溶液型	59		-24.2~-3.84		114~160	0.68~1	6.16~24.08
		含子晶型	6			193~>500	116~146		28.47~28.6
IIb	石英和萤石	水溶液型	40		-24.9~-12.7		118~142	0.62~1	16.62~24.29
		含子晶型	2			160~170	119		28.55
III	石英和方解石	水溶液型	22		-24.9~-4.97		120~177	0.62~1	7.86~24.29

注: N—测试样品数; T_m—为初熔温度; T_{m, ice}—为冰点温度; T_{m, NaCl}—为子晶消失温度; T_h—为完全均一温度; X_{NaCl}—代表 NaCl/(NaCl+CaCl₂); 包裹体全部均一至液相。

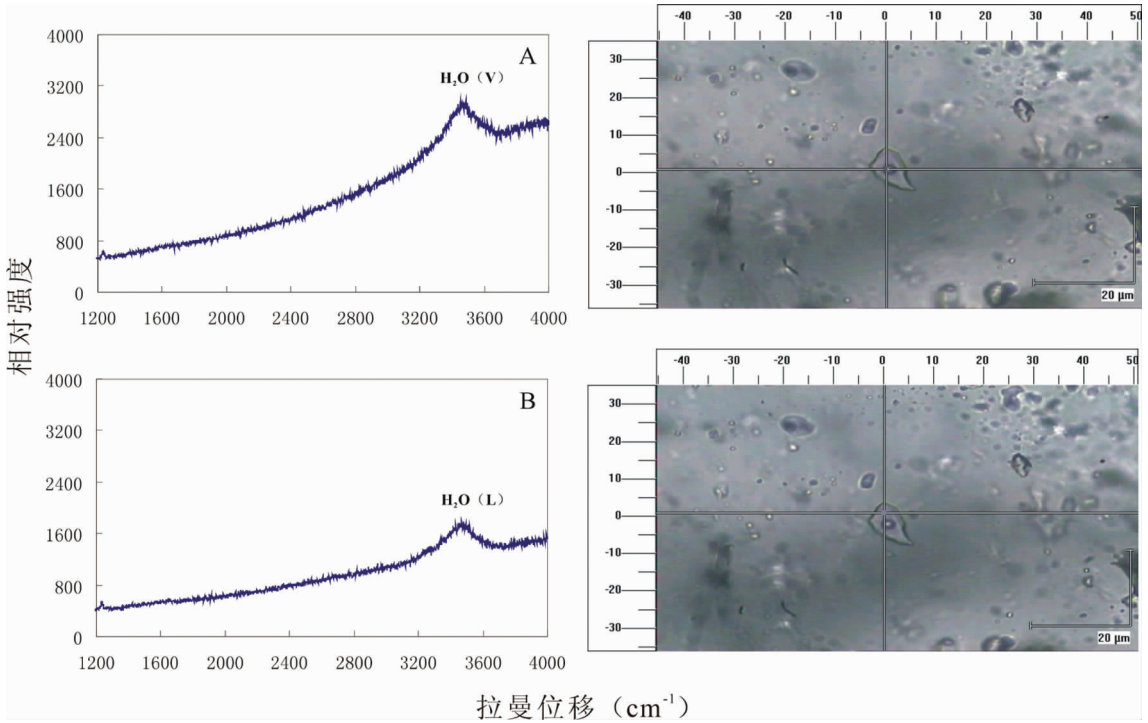


图 6 寨凹钼矿流体包裹体激光拉曼光谱分析

A—石英-辉钼矿阶段石英中水溶液包裹体的气相成分为 H₂O; B—石英-辉钼矿阶段石英中水溶液包裹体的液相成分为 H₂O

Fig.6 Laser-Raman spectrum of fluid inclusions of the Zhaiwa Mo deposit

A—spectrum showing that the vapor component of NaCl-H₂O type fluid inclusion in quartz of quartz-molybdenite stage is H₂O; B—spectrum showing that the liquid component of NaCl-H₂O type fluid inclusion in quartz of quartz-molybdenite stage is H₂O

0.68~1;继续升温,包裹体向液相均一,其均一温度为 114~160℃。含子晶型包裹体的子晶呈立方体状和椭圆状等,主要为石盐和钾盐;包裹体均一成液相,均一温度为 116~146℃;子晶熔化温度均高于均一温度,部分子晶在 193~311℃熔化,可计算出相应盐度为 (28.44~28.6)wt%NaCl.eqv, 另有部分到 500℃时仍未熔化,说明其盐度高达 59.76 wt%NaCl.eqv。

石英-黄铜矿阶段(Ⅱb),以水溶液型包裹体为主,含子晶型为次。其中,水溶液型包裹体冷冻至-100℃以下液相全冻,开始回温,测得冰点温度为-24.9~-12.7℃,大量低于共结温度(-20.8℃)的冰点温度的存在,也指示成矿流体为 H₂O-NaCl-CaCl₂ 体系,据此,可计算出相应盐度为 16.62~24.29wt %NaCl.eqv,且 NaCl/(NaCl+CaCl₂)为 0.62~1;继续升温,包裹体向液相均一,其均一温度为 118~142℃。含子晶型包裹体的子晶呈立方体状和椭圆状等,主要为石盐和钾盐;包裹体均一成液相,均一温度为 119℃;子晶熔

化温度均高于均一温度,在 160~170℃时熔化,可计算出相应盐度为 28.55 wt%NaCl.eqv。

石英-碳酸盐阶段(Ⅲ),仅见水溶液型包裹体。冷冻至-100℃以下液相全冻,开始回温,测得冰点温度为-24.9~-4.97℃,大量低于共结温度(-20.8℃)的冰点温度的存在,也指示成矿流体体系为 H₂O-NaCl-CaCl₂ 体系,据此,可计算出相应盐度为 (7.86~24.29)wt%NaCl.eqv,且 NaCl/(NaCl+CaCl₂)为 0.62~1;继续升温,包裹体向液相均一,其均一温度为 120~177℃。

将上述研究结果总结于图 8 和表 1,可见 I 阶段石英和萤石中包裹体的均一温度为 100~260℃,主体在 110~200℃,范围较宽,反映了流体捕获历史的多期性^[43];其盐度为 (2~25)wt%NaCl.eqv,显示双峰的特征,峰值分别为 (4~8)wt%NaCl.eqv 和 (23~25)wt%NaCl.eqv。Ⅱa 阶段石英和萤石中包裹体的均一温度为 110~160℃,盐度为 (6~30)wt%NaCl.eqv,峰值为

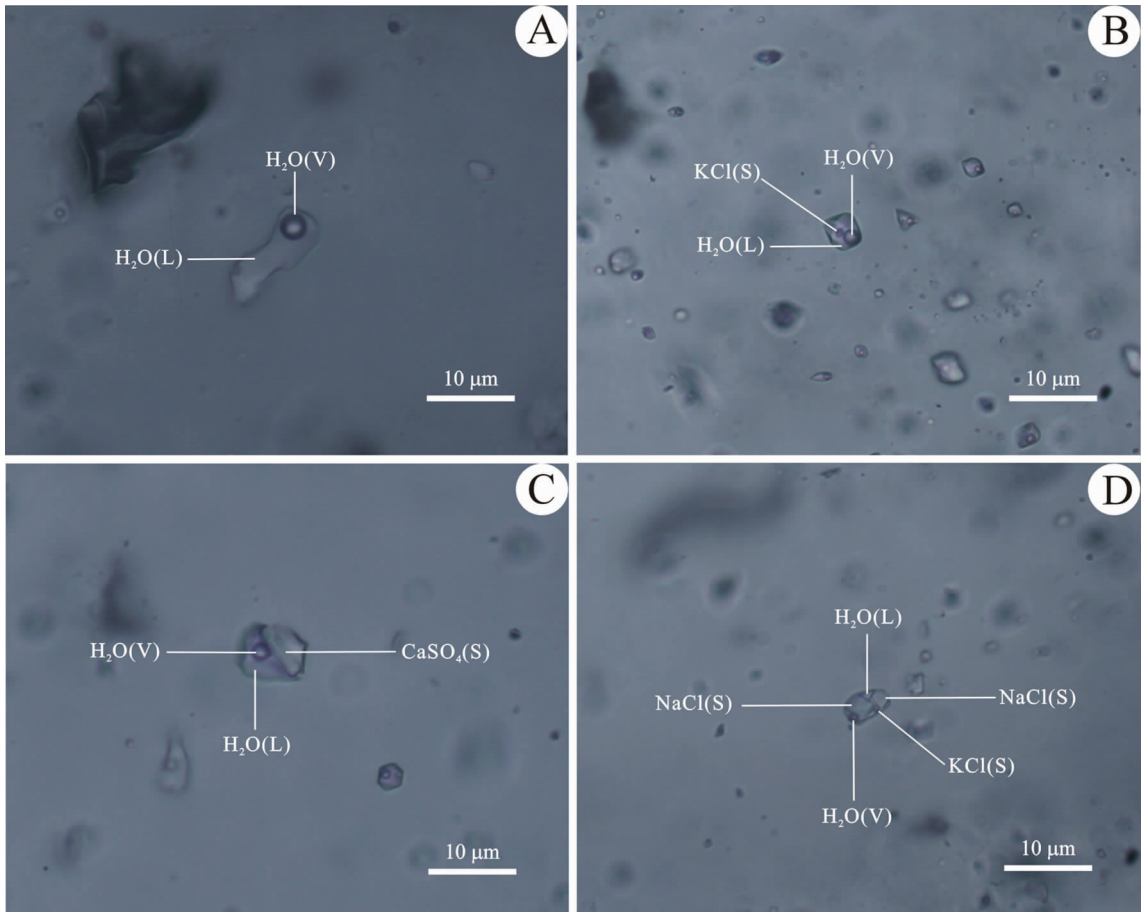


图 7 寨凹钼矿典型流体包裹体显微照片

A—石英—辉钼矿阶段石英中气液两相水溶液包裹体；B—石英—辉钼矿阶段石英中的含子晶型包裹体，椭圆形子晶指示可能为钾盐(KCl)；C—石英—辉钼矿阶段石英中的含子晶型包裹体，长板状子晶指示可能为石膏(CaSO_4)；

D—石英—辉钼矿阶段石英中的含多个子晶型包裹体，立方体子晶指示为石盐(NaCl)，椭圆形子晶指示可能为钾盐(KCl)

Fig.7 Microphotographs of representative fluid inclusions of the Zhaiwu Mo deposit

A—NaCl-H₂O type fluid inclusion in quartz of quartz-molybdenite stage;

B—daughter crystal-bearing type fluid inclusion in quartz of quartz-molybdenite stage, daughter crystal is KCl;

C—daughter crystal-bearing type fluid inclusion in quartz of quartz-molybdenite stage, daughter crystal is CaSO_4 ;

D—daughter crystal-bearing type fluid inclusion in quartz of quartz-molybdenite stage, daughter crystal is NaCl and KCl

(23~24) wt%NaCl.eqv。II b 阶段石英和萤石中包裹体的均一温度为 110~150℃，与 II a 阶段近似，反映二者为同一阶段的产物；其盐度为 (16~29)wt%NaCl.eqv，峰值为 (23~25)wt%NaCl.eqv，也与 II a 阶段近似，说明 II a 与 II b 可作为一个阶段，即石英—多金属硫化物阶段。III 阶段石英和碳酸盐中包裹体的均一温度为 120~180℃，略高于 II 阶段，可能是由于伸展作用导致了包裹体（特别是当包裹体的寄主矿物为方解石时）的不真实的相对高的均一温度值^[43]；其盐度为 7~25wt%NaCl.eqv，峰值为 (22~25)wt%NaCl.eqv。总

体而言，从 I 阶段到 II 阶段，流体包裹体均一温度略有降低，温度范围由宽变窄，到 III 阶段略有回升，指示寨凹钼矿含 CaCl_2 流体的捕获历史以温度和压力随时间降低为特征，这与区域地壳抬升相对应。盐度总体较高，均可见峰值为 (23~25)wt%NaCl.eqv，这是由于成矿流体为 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ 体系，从早到晚，由双峰演化成单峰，指示成矿流体逐渐均一。

I、II 阶段均可见子晶，I 阶段子晶在 500℃时仍未融化，远远高于气泡消失温度(141~182℃)，说明 I 阶段含子晶包裹体为从原始过饱和溶液中捕获

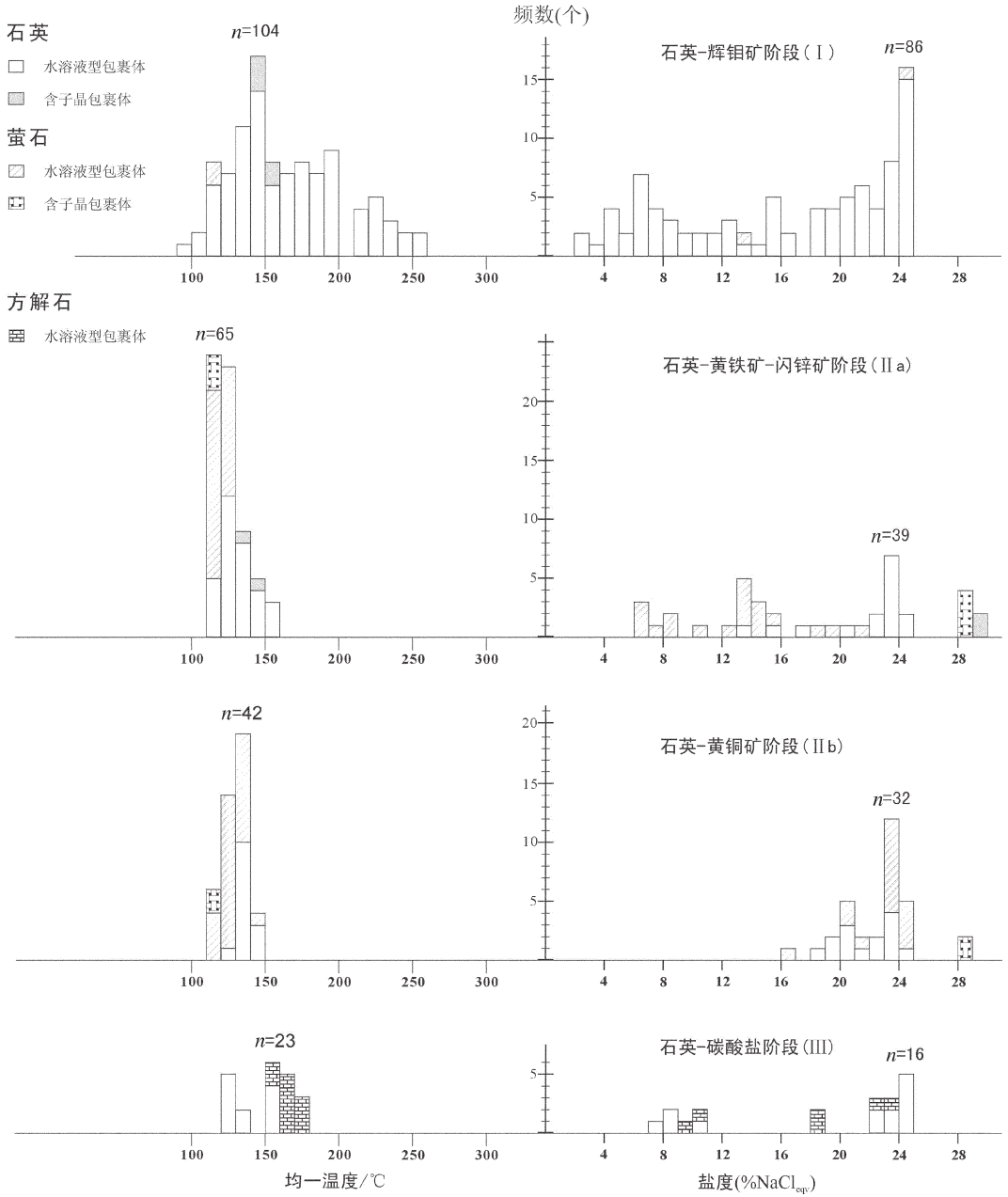


图 8 寨凹钼矿床流体包裹体均一温度和盐度直方图
 Fig.8 Histograms of homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions of the Zhaiwa Mo deposit

的; II a 阶段含子晶包裹体的子晶可分两种,一种是含 NaCl 子矿物,加热至 193~311°C 时溶解,另一种是含石膏子矿物,加热至 500°C 时仍未熔化,但二者熔化温度均高于气泡消失温度(116~146°C),说明 II a 阶段含子晶包裹体为从原始过饱和溶液中捕获的; II b 阶段含子晶包裹体加热至 160~170°C 时熔化,均

高于气泡消失温度 119°C,说明 II b 阶段含子晶包裹体为从原始过饱和溶液中捕获的。因此,本矿床含子晶型流体包裹体的子矿物均捕获自原始过饱和溶液。在温度-盐度双变量图中(图 9),各阶段数据近似呈直线型排列,可看作是原始流体的理论演化轨迹。石英-辉钼矿阶段,直线斜率为负值,指示了典

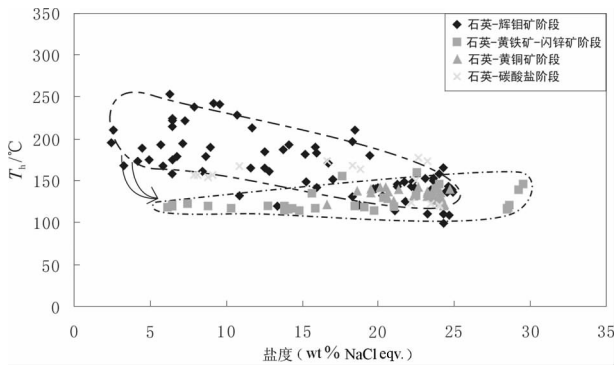


图9 寨凹钼矿各阶段流体包裹体温度-盐度分布图
Fig.9 Covariant temperature-salinity of fluid inclusions in the Zhaiwa Mo deposit

型的沸腾趋势,因为流体的沸腾伴随绝热冷却,使残余溶液温度的降低以及盐度的增加,盐度的双峰特征也证明了沸腾作用的存在;同时,也可能存在流体混合,可解释为热的岩浆流体与下部冷的CaCl₂卤水的混合。石英-多金属硫化物阶段,直线近水平,指示了原始流体与不同盐度的流体等温混合的结果,这在侵入体内部和围绕侵入体的对流驱动的热液流体循环中常见。

4.4 成矿压力和深度估算

本矿床成矿流体为H₂O-NaCl-CaCl₂体系,目前还没有相应的P-T相图以供密度和压力估算,考虑到各阶段存在大量NaCl/(NaCl+CaCl₂)为1的包裹

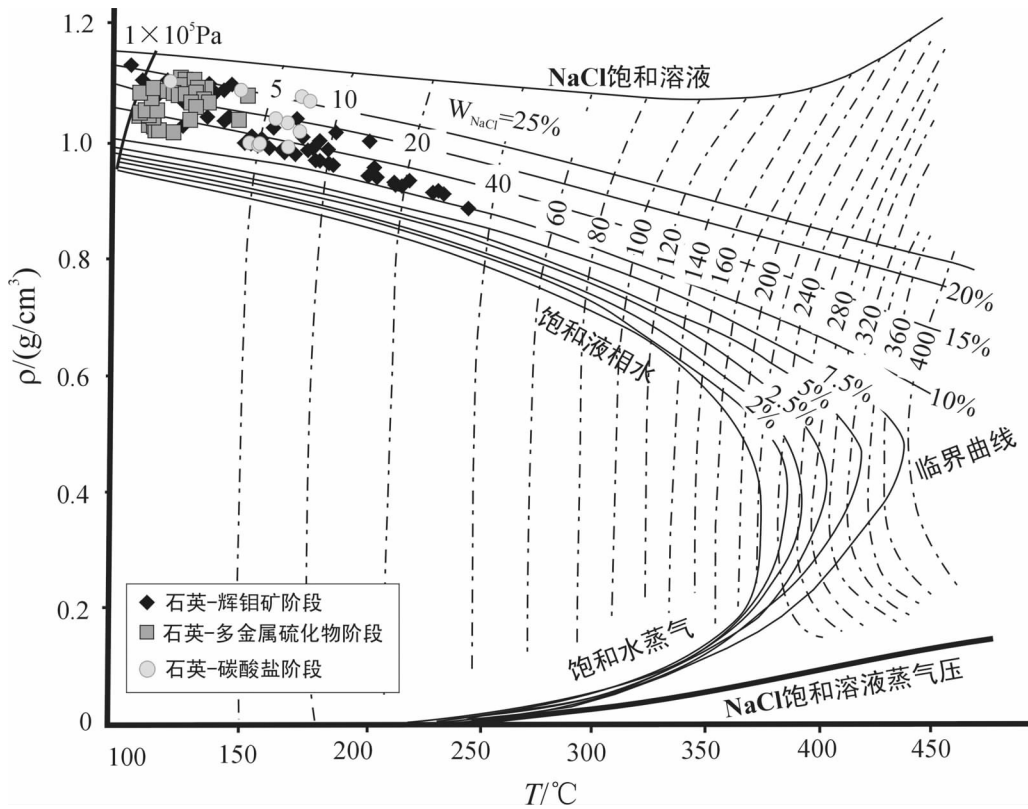


图10 NaCl-H₂O体系 T-ρ 相图^[45]
Fig.10 T-ρ phase diagram for the system of NaCl-H₂O^[45]

表2 流体包裹体密度、压力和深度估算结果

Table 2 Density, pressure and depth of fluid inclusions

阶段	寄主矿物	包裹体类型	n	均一温度(°C)	盐度(wt% NaCl eqv.)	密度(g/cm ³)	均一压力(×10 ⁵ pa)	静水深 度(m)	静岩深 度(m)
I	石英和萤石	水溶液型	60	110~253	2.41~23.2	0.67~1.13	1~40	400	145
II	石英和萤石	水溶液型	42	114~160	6.16~23.2	1.02~1.11	1~5	50	16
III	石英和方解石	水溶液型	12	124~177	7.86~23.2	0.99~1.10	5~10	100	32

体,这类包裹体可近似的看做 $H_2O-NaCl$ 体系,从而利用 $H_2O-NaCl$ 体系相关相图估算密度和压力。

根据 $NaCl/(NaCl+CaCl_2)$ 为 1 的包裹体的均一温度和盐度,利用 $NaCl-H_2O$ 溶液密度式 $D=A+Bt+Ct^2$ [44] 求得密度(表 2)。由表 2 可知,Ⅰ阶段流体密度为 $0.67\sim 1.13\text{ g/cm}^3$,Ⅱ阶段流体密度为 $1.02\sim 1.11\text{ g/cm}^3$,Ⅲ阶段流体密度为 $0.99\sim 1.10\text{ g/cm}^3$,从早到晚,密度略有升高。总体来说,本矿床不同成矿阶段流体均属于高密度流体,由于盐度增加或温度降低都能引起流体密度的增高,因此,本矿床高密度的特征与低温、高盐度的流体包裹体特征相符合。

根据 $NaCl/(NaCl+CaCl_2)$ 为 1 的包裹体的均一温度和密度,利用提供的 $T-\rho$ 相图 [45],可投点估算出均一压力,即最小捕获压力。由图 10 可知,Ⅰ阶段流体包裹体均一压力为 $1\times 10^5\sim 40\times 10^5\text{ Pa}$,Ⅱ阶段流体密度为 $1\times 10^5\sim 5\times 10^5\text{ Pa}$,Ⅲ阶段流体密度为 $5\times 10^5\sim 10\times 10^5\text{ Pa}$,总体显示了较低压力环境。

由图 10 可知,求得的本矿床成矿流体均一压力相对较低,为最低捕获压力。根据捕获压力,求得Ⅰ阶段成矿静水深度为 400 m (设水密度为 1 g/cm^3),静岩深度为 145 m (设岩石密度为 2.75 g/cm^3),给出浅成-超浅成的成矿环境。但是,笔者怀疑这种根据水溶液包裹体估算压力方法的可靠性,建议估算数据仅作参考。

5 讨论

5.1 含 $CaCl_2$ 流体的来源

由流体包裹体温度、压力等的物理化学条件演化可知,本矿床的含 $CaCl_2$ 流体的捕获历史以与区域地壳抬升相对应的温度和压力随时间降低为特征。那么,含 $CaCl_2$ 流体来源于哪儿?它是如何参与成矿的?

与自然的地表水和地下水相比较, $CaCl_2$ 卤水的标志性特征为高盐度 [46]。低温、高盐度的含 $CaCl_2$ 卤水贯穿于本矿床,而在澳大利亚昆士兰的 Cloncurry 地区的热液成矿系统亦可见这类流体 [43],甚至在加拿大地盾、Kola 半岛的超深钻中可以见到地体尺度的 $CaCl_2$ 流体循环。Xu [43] 对澳大利亚昆士兰的 Cloncurry 地区热液成矿系统进行研究后认为,Cloncurry 地区的 $CaCl_2$ 卤水以低温、含 $CaCl_2$ 流体包裹体为特征,它是在深部地壳岩石剥露期间,蒸发岩与其下渗透的大气水之间的相互作用而形成,

并且随着地壳抬升,早期的岩浆水、变质水逐渐被大气水交代。Hardie [46] 在解释现代裂谷中发现的热卤水时认为, $CaCl_2$ 卤水也可以由绿岩带相温度时变基性岩中的钠长石产生。

考虑到寨凹地区地层为太华群变质基底和熊耳群盖层,未见蒸发岩的存在,且寨凹钼矿的赋矿地层为太华超群石板沟组,岩性为黑云角闪斜长片麻岩等。韩以贵等 [47] 对熊耳群火山岩的钠长石化进行研究后发现,其长石主要为钠长石,主要来源于岩浆期后蚀变作用和火山岩喷发晚期海水的贯入。因此,围岩和矿脉中大量钠长石的存在指示 Hardie [46] 的机制更适合解释本矿床 $CaCl_2$ 卤水产生,即 $CaCl_2$ 卤水是由熊耳群火山岩钠长石化和太华群石板沟组斜长片麻岩中的钠长石产生的。

5.2 流体混合与成矿物质沉淀

寨凹钼矿的流体演化具有如下特征:(1)流体包裹体均一温度由石英-辉钼矿阶段的较宽范围($100\sim 260^\circ\text{C}$)向石英-硫化物阶段的相对较窄范围($120\sim 160^\circ\text{C}$)演化;(2)石英-辉钼矿阶段流体包裹体的温度-盐度双变图显示了负的相关性,石英-硫化物阶段近似为直线;(3)流体包裹体盐度由石英-辉钼矿阶段的双峰式分布向石英-硫化物阶段的单峰演化。这指示了流体混合是本矿床成矿物质沉淀的主要机制 [43,48],石英-辉钼矿阶段的热岩浆流体与冷的含 $CaCl_2$ 的卤水混合,导致了辉钼矿的沉淀,演化为石英-硫化物阶段单一的冷的含 $CaCl_2$ 的卤水。因此,流体混合是导致成矿的主要原因。

5.3 矿床成因

斑岩型和矽卡岩型钼矿床(含伴生钼矿床)已被广泛接受,相关研究较多 [1,7,9]。近年来,受构造控制的脉状钼矿床大量发现,比如纸房石英脉型钼矿床 [13]、大湖金钼矿床 [8,14] 等,其成因类型被厘定为造山型,成为了一种新的重要钼矿类型。寨凹钼矿虽然是受构造控制的石英脉型钼矿,显示造山型钼矿的宏观地质特征,并被推测为造山型,但其流体包裹体以高密度、高盐度为特征,显然更符合与侵入岩有关的成矿系统 [23-24],即 Intrusion-related lode deposit。因此,有必要将寨凹钼矿与侵入体有关的脉状矿床进行系统比较(表 3)。

由表 3 可知,寨凹钼矿大部分特征与侵入岩有关的成矿系统相符,但仍有部分特征不合:(1)与侵入岩有关的成矿系统发育 3 种类型包裹体: CO_2-

表 3 寨凹钼矿和与侵入岩有关的金矿床成矿系统的典型特征对比
 Table 3 Comparison of representative characteristics between Zhaiwa Mo deposit and intrusion-related deposit

与侵入岩有关的金矿 ^[23-24]	寨凹钼矿床
产于汇聚板块边缘内的陆壳背景,或大陆碰撞带	产于秦岭造山带北部刚性基底推覆体的熊耳地体
矿床产于浅侵位中酸性岩体的内部和或接触带,矿体呈脉状产在侵入体附近的围岩裂隙或断裂构造	矿体呈脉状产出,受断裂构造控制
矿床发育角砾状、网脉浸染状构造	矿床发育角砾状、浸染状构造
围岩蚀变由高温蚀变组合(钾长石化、钠长石化、黑云母化等)降为低温蚀变组合,由面型渗透蚀变变为线型贯入蚀变,由碱交代变为酸淋滤蚀变	围岩蚀变主要有硅化、碳酸盐化、绢云母化、绿泥石化等
成矿系统发育3种类型包裹体:CO ₂ -H ₂ O型、NaCl-H ₂ O型及含子晶包裹体	成矿系统发育2类包裹体:水溶液型和含子晶型
成矿流体系统成分为不同盐度的H ₂ O-CO ₂ 体系,可见少量CH ₄ 和N ₂	包裹体成分主要为H ₂ O
流体包裹体捕获温度变化范围大,为140~550℃	流体包裹体均一温度为100~260℃,峰值为130~160℃
流体包裹体捕获压力变化范围大,40~290 MPa	流体包裹体均一压力为1×10 ⁵ ~40×10 ⁵ pa
成矿流体系统与深度有关,至少含一类高盐度流体,其流体包裹体盐度变化范围可为0~36 mass% NaCl eq.,含CaCl ₂ 包裹体可达50 mass% NaCl eq.	矿床发育含子晶型包裹体,其盐度可达28.47~28.6 wt%NaCl.eqv,含CaCl ₂ 包裹体甚至可达59.76wt%NaCl.eqv.
成矿深度变化范围广(<1km~>7km),在地壳浅部(~<5 km),矿床与岩株、岩床、岩墙以及火山穹窿有关,金矿化以浅成低温型脉、网状脉和角砾岩筒产出	成矿深度为400 m,相对较浅,钼矿化以浅成低温型脉产出

H₂O型、NaCl-H₂O型及含子晶包裹体,而寨凹钼矿仅含有水溶液型和含子晶型,缺乏CO₂-H₂O型包裹体;(2)寨凹钼矿流体包裹体均一温度、压力相对较低,其成矿深度相对较浅。

岩浆热液流体成矿系统的研究表明,A型俯冲与B型俯冲背景下形成的岩浆矿床具有不同的流体包裹体特征^[23],前者常含CO₂-H₂O型包裹体,后者往往缺乏此类包裹体,因此,寨凹钼矿CO₂-H₂O型包裹体的缺乏指示其成矿背景可能为B型俯冲有关。

寨凹钼矿的成矿温压相对较低,由其指示的成矿深度亦较浅,这可解释为与熊耳群火山岩有关,且含CaCl₂流体参与成矿的缘故。本矿床的含CaCl₂流体的捕获历史以与区域地壳抬升相对应的温度和压力随时间降低为特征,在地壳浅部有利的构造部位,热的岩浆流体与冷的含CaCl₂的卤水混合,并由此导致了辉钼矿的沉淀。

综上所述,尽管寨凹钼矿床部分地质和流体包裹体特征与国内外与侵入岩有关金矿成矿系统的典型特征^[23-24](表3)不同,考虑受到CaCl₂流体的影响,笔者认为寨凹钼矿为与侵入岩有关的矿床。

6 结 论

(1)寨凹钼矿床位于秦岭造山带北部刚性基底

推覆体的熊耳地体,矿床定位受马超营断裂带的次级断裂控制,矿体呈脉状赋存于太华超群石板沟组黑云角闪斜长片麻岩;矿床发育角砾状、浸染状构造;围岩蚀变主要有硅化、碳酸盐化、绢云母化、绿泥石化等;成矿过程包括3个阶段:石英-辉钼矿阶段(I)、石英-多金属硫化物阶段(II)、石英-碳酸盐阶段(III),I阶段为主成矿阶段。

(2)寨凹钼矿床发育2类流体包裹体,即水溶液型和含子晶包裹体;激光拉曼指示包裹体成分主要为H₂O;从早到晚,流体包裹体均一温度从100~260℃,经110~160℃,变化为120~180℃,矿床总体属于低温热液矿床;流体包裹体盐度从I阶段的(2~25)wt%NaCl.eqv演化至II阶段的(6~30)wt%NaCl.eqv,然后降为III阶段的(7~25)wt%NaCl.eqv。寨凹钼矿流体包裹体以高密度、高盐度的低温低压流体为特征,是含CaCl₂流体参与成矿的结果,流体混合(热的岩浆流体与冷的含CaCl₂的卤水混合)是主要的成矿机制。

(3)寨凹钼矿床地质和流体包裹体特征与侵入岩相关的成矿系统一致,指示其成因类型为与侵入岩有关的钼矿床。

致谢:研究工作得到赖勇副教授指导,野外工作得到河南有色地勘局有关同行的大力支持,实验室研究得到北京大学任景秋、倪德宝等高级工程师的

帮助, 评审人提出了宝贵的修改意见, 特致谢意!

参考文献(References):

- [1] 李诺, 陈衍景, 张辉, 等. 东秦岭斑岩钼矿带的地质特征和成矿构造背景[J]. 地学前缘, 2007, 14(5):186-198.
Li Nuo, Chen Yanjing, Zhang Hui, et al. Molybdenum deposits in East Qinling [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14 (5):186-198(in Chinese with English abstract).
- [2] 胡受奚(主编). 华北与华南古板块拼合带地质和成矿[M]. 南京: 南京大学出版社, 1988:588.
Hu Shouxi (ed.). Geology and Metallogeny of the Collision Belt Between the South China and North China Plates [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1988:558 (in Chinese).
- [3] 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 等. 东秦岭地区钼矿床的铼-钨同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 1994, 13(3):221-230.
Huang Dianhao, Wu Chengyu, Du Andao, et al. Re-Os isotopic ages of molybdenum deposits in east Qinling and their significance [J]. Mineral Deposits, 1994,13(3):221-230(in Chinese with English abstract).
- [4] 陈衍景. 影响碰撞造山成岩成矿模式的因素及其机制 [J]. 地学前缘, 1998, 5(增刊):109-118.
Chen Yanjing. Constraints and their mechanism on the petrogenic and metallogenic model for collision orogenesis [J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(supp.):109-118(in Chinese).
- [5] 陈衍景, 李超, 张静, 等. 秦岭钼矿带斑岩体锶氧同位素特征与岩石成因机制和类型[J]. 中国科学(D 辑)2000, 30(增刊):64-72.
Chen Yanjing, Li Chao, Zhang Jing, et al. Sr and O isotopic characteristics of porphyries in the Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type [J]. Science in China (Series D), 2000, 43(Supp.):82-94 (In Chinese with English abstract).
- [6] 李永峰, 王春秋, 白凤军, 等. 东秦岭钼矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿动力学背景[J]. 矿产与地质, 2004, 18(6):571-578.
Li Yongfeng, Wang Chunqiu, Bai Fengjun, et al. Re-Os isotopic ages of Mo deposits in east Qinling and their geodynamics settings [J]. Mineral Resources and Geology, 2004, 18 (6):571-578 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李永峰, 毛景文, 胡华斌, 等. 东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景[J]. 矿床地质, 2005, 24(3):292-304.
Li Yongfeng, Mao Jingwen, Hu Huabin, et al. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic molybdenum deposits in East Qinling area [J]. Mineral Deposits, 2005, 24 (3): 292-304(in Chinese with English abstract).
- [8] 李诺, 孙亚莉, 李晶, 等. 小秦岭大湖金钼矿床辉钼矿铼钨同位素年龄及印支期成矿事件[J]. 岩石学报, 2008, 24(4):810-816.
Li Nuo, Sun Yali, Li Jing, et al. Molybdenite Re-Os isotope age of the Dahu Au-Mo deposit, Xiaoqinling and the Indosinian mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(4):810-816 (In Chinese with English abstract).
- [9] 张正伟, 朱炳泉, 常向阳, 等. 东秦岭钼矿带成岩成矿背景及时空统一性[J]. 高校地质学报, 2001, 7(3):307-315.
Zhang Zhengwei, Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, et al. Petrogenetic-Metallogenic background and time-space relationship of the East Qinling Molybdenum ore belt, China [J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7(3):307-315(In Chinese with English abstract).
- [10] 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. 中国地质, 2006, 33:1181-1196.
Chen Yanjing. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential [J]. Geology in China, 2006, 33:1181-1196 (In Chinese with English abstract).
- [11] 刘国印, 温森坡, 田恪强, 等. MoS₂ 的同质异相与纸房石英大脉型钼矿床. 中国钼业, 2007, 31(2):14-17.
Liu Guoyin, Wen Senpo, Tian Keqiang, et al. Isomerism of MoS₂ and Zhifang thick-vein type molybdenum deposit [J]. China Molybdenum Industry, 2007, 31(2):14-17(in Chinese with English abstract).
- [12] 温森坡, 刘国印, 乔保龙, 等. 嵩县纸房钼矿地质特征与找矿方向[J]. 中国钼业, 2008, 32(2):14-17.
Wen Senpo, Liu Guoyin, Qiao Baolong, et al. Geological characteristics and ore-prospecting direction of Zhifang molybdenum deposit in Songxian [J]. China Molybdenum industry, 2008, 32(2): 14-17(in Chinese with English abstract).
- [13] 邓小华, 李文博, 李诺, 等. 河南嵩县纸房钼矿床流体包裹体研究及矿床成因[J]. 岩石学报, 2008, 24(9):2133-2148.
Deng Xiaohua, Li Wenbo, Li Nuo, et al. Fluid inclusion constraints on the origin of the Zhifang Mo deposit, Songxian Coutry, Henan province [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 24(9): 2133-2148(In Chinese with English abstract).
- [14] 倪智勇, 李诺, 管申进, 等. 河南小秦岭金矿田大湖金-钼矿床流体包裹体特征及矿床成因[J]. 岩石学报, 2008, 24(9):2058-2068.
Ni Zhiyong, Li Nuo, Guan Shenjin, et al. Characteristics of fluid inclusions and ore genesis of the Dahu Au-Mo deposit in the Xiaoqinling gold field, Henan province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(9):2058-2068 (in Chinese with English abstract).
- [15] 陈衍景, 李晶, Franco Pirajno, 等. 东秦岭上宫金矿流体成矿作用、矿床地质和包裹体研究[J]. 矿物岩石, 2004, 24(3):1-12.
Chen Yanjing, Li Jing, Pirajno F, et al. Hydrothermal metallogeny of the Shanggong gold deposit:studies on ore geology and fluid inclusion geochemistry [J]. Journal of Mineralogy and Petrology (Kuangwu Yanshi), 2004, 24 (3):1-12 (in Chinese with English abstract).
- [16] 陈衍景, 林治家, Franco Pirajno, 等. 东秦岭上宫金矿流体成矿作用:稳定同位素地球化学研究[J]. 矿物岩石, 2004, 24(3):13-21.
Chen Yanjing, Lin Zhijia, Pirajno F, et al. Hydrothermal metallogeny of the Shanggong gold deposit, east Qinling:study on the stable isotope geochemistry [J]. Journal of Mineralogy and Petrology (Kuangwu Yanshi), 2004, 24(3):13-21(in Chinese with

- English abstract).
- [17] 陈衍景, 唐国军, Franco Pirajno, 等. 东秦岭上宫金矿流体成矿作用; 放射成因同位素地球化学研究[J]. 矿物岩石, 2004, 24(3): 22-27.
Chen Yanjing, Tang Guojun, Pirajno F, et al. Hydrothermal metallogeny of the Shangong gold deposit, east Qinling: Radiogenic isotope geochemistry [J]. Journal of Mineralogy and Petrology (Kuangwu Yanshi), 2004, 24(3):22-27 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李晶, 陈衍景, 李强之, 等. 东秦岭上宫金矿流体成矿作用: 矿物学研究[J]. 矿物岩石, 2004, 24(3):28-35.
Li Jing, Chen Yanjing, Li Qiangzhi, et al. Hydrothermal metallogeny of the Shangong gold deposit: evidence from mineralogical study[J]. Journal of Mineralogy and Petrology (Kuangwu Yanshi), 2004, 24(3): 28-35(in Chinese with English abstract).
- [19] 陈衍景, 隋颖慧, Franco Pirajno. CMF 模式的排他性依据和造山型银矿实例: 东秦岭铁炉坪银矿同位素地球化学[J]. 岩石学报, 2003, 19(3):552-568.
Chen Yanjing, Sui Yinghui, Pirajno F. Exclusive evidences for CMF model and a case of orogenic silver deposits: Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, east Qinling orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19 (3):551-568 (In Chinese with English abstract).
- [20] Chen Yanjing, Pirajno F, Sui Yinghui. Geology and D-O-C isotope systematics of the Tieluping silver deposit, Henan, China: Implications for ore genesis[J]. Acta Geol. Sin., 2005, 79: 106-119.
- [21] 赵太平, 翟明国, 夏斌, 等. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究: 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约 [J]. 科学通报, 2004, 9(22):2342-2349.
Zhao Taiping, Zhai Mingguo, Xia Bin, et al. Study on the zircon SHRIMP ages of the Xiong'er Group volcanic rocks: constraint on the starting time of covering strata in the North China Craton [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 9(23):2495-2502(in Chinese).
- [22] 胡受奚. 交代蚀变岩石学及其找矿意义[M]. 北京: 科学出版社, 2004:264.
Hu Shouxi. Petrology of Metasomatic Rocks and Implications for Ore Exploration[M]. Beijing: Science Press, 2004:264(in Chinese).
- [23] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, 等. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. 岩石学报, 2007, 23(9):2085-2108.
Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, et al. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (9):2085-2108 (in Chinese with English abstract).
- [24] Mernagh T P, Bastrakov E N, Zaw K, et al. Comparison of fluid inclusion data and mineralization Processes for Australian orogenic gold and intrusion-related gold systems [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(1):21-32.
- [25] 陈衍景, 富士谷. 豫西金矿成矿规律 [M]. 北京: 地震出版社, 1992:234.
Chen Yanjing, Fu Shigu. Gold Mineralization in West Henan, China[M]. Beijing: Seismological Press, 1992:234 (in Chinese).
- [26] Chen Y J, Zhao Y C. Geochemical characteristics and evolution of REE in the early Precambrian sediments: evidences from the southern margin of the North China craton [J]. Episodes, 1997, 20(2):109-116.
- [27] 陈衍景, 刘丛强, 陈华勇, 等. 中国北方石墨矿床及赋矿孔达岩系碳同位素特征及有关问题讨论 [J]. 岩石学报, 2000, 16(2): 233-244.
Chen Yanjing, Liu Congqiang, Chen Huayong, et al. Carbon isotope geochemistry of graphite deposits and ore-bearing khondalite series in North China. Implications for several problems [J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(2):233-244 (in Chinese, with English Abstract).
- [28] 贾承造, 施央申, 郭令智. 东秦岭板块构造[M]. 南京: 南京大学出版社, 1988:130.
Jia Chengzao, Shi Yangshen, Guo Lingzhi. Plate tectonics of Eastern Qinling Mountains of China [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1988:130(in Chinese with English abstract).
- [29] 孙枢, 张国伟, 陈志明. 华北断块区南部前寒武纪地质演化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985: 267.
Sun Su, Zhang Guowei, Chen Zhiming. Geologic Evolution of the South of the North China Fault-block [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985:267(in Chinese).
- [30] 孙大中, 李惠民, 林贤源, 等. 中条山前寒武纪年代学, 年代构造格架和年代地壳结构模式的研究 [J]. 地质学报, 1991, 65:216-231.
Sun Dazhong, Li Huiming, Lin Xianyuan, et al. Precambrian geochronology, chronotectonic framework and model of chronocrustal structure of the Zhongtiao mountains [J]. Acta Geol. Sin., 1991, 65:216-231(in Chinese with English abstract).
- [31] Zhao T P, Zhou M F, Zhai M, et al. Paleoproterozoic rift-related volcanism of the Xiong'er Group, North China Craton: implications for the breakup of Columbia[J]. International Geology Reviews, 2002, 44:336-351.
- [32] 范宏瑞, 谢亦汉, 王英兰. 豫西花山花岗岩岩浆热液的性质及与金成矿的关系[J]. 岩石学报, 1993, 9:136-145.
Fan Hongrui, Xie Yihan, Wang Yinglan. The properties of magmatic hydrothermal fluid of Huashan granitic batholith in western Henan province and their relationship to gold mineralization [J]. Acta Petrol. Sin., 1993, 9:136-145 (in Chinese with English abstract).
- [33] 王海华, 陈衍景, 高秀丽. 河南康山金矿同位素地球化学及其对碰撞造山成矿模式的例证[J]. 矿床地质, 2001, 20:190-198.
Wang Haihua, Chen Yanjing, Gao Xiuli. The isotope geochemistry of the Kangshan gold deposit, Henan and its illustration of the CPMF model [J]. Mineral Deposit, 2001, 20: 190-198(In Chinese with English Abstract).
- [34] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001:855.
Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling

- Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001:855(in Chinese).
- [35] 范宏瑞, 谢奕汉, 郑学正, 等. 河南祁雨沟热液角砾岩体型金矿床成矿流体研究[J]. 岩石学报, 2000, 16(4):559-563.
Fan Hongrui, Xie Yihan, Zheng Xuezheng, et al. Ore-forming fluids in hydrothermal breccia-related gold mineralization in Qiyugou, Henan Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(4):559-563 (in Chinese with English abstract).
- [36] 郭东升, 陈衍景, 祁进平. 河南祁雨沟金矿同位素地球化学和矿床成因分析[J]. 地质论评, 2007, 53(2):217-228.
Guo Dongsheng, Chen Yanjing, Qi Jinping. Isotope geochemistry and ore genesis of the Qiyugou gold deposit, Henan: A synthesis [J]. Geological Review, 2007, 53 (2):217-228 (in Chinese with English Abstract).
- [37] Chen Y J, Chen H Y, Zaw K, et al. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: an overview[J]. Ore Geology Reviews, 2007, 31:139-169.
- [38] 杨群周, 彭省临, 张侍威, 等. 豫西寨凹斑岩型铜矿地质特征及其成矿远景[J]. 地质找矿论丛, 2003, 18(1):43-46.
Yang Qunzhou, Peng Shenglin, Zhang Shiwei, et al. Geological characteristics and ore-forming prospect of Zhaiwa copper ore of porphyry type in west Henan [J]. Contributions Geology and Mineral Resources Research, 2003, 18(1):31-34 (in Chinese with English abstract).
- [39] 杨群周, 张录星, 彭省临, 等. 豫西寨凹地区地球化学特征及找矿方向[J]. 矿产与地质, 2003, 17(增刊):458-460.
Yang Qunzhou, Zhang Luxing, Peng Shenglin, et al. Geochemical characteristics and prospecting direction of Zhaiwa region, western Henan[J]. Mineral Resources and Geology, 2003, 17(Supp.):458-460 (in Chinese with English abstract).
- [40] 刘灵恩, 胡国民, 支凤歧. 豫西寨凹隐伏岩体对周边银多金属矿的控矿作用[J]. 矿产与地质, 2004, 18(1):31-34.
Liu Lingen, Hu Guoming, Zhi Fengqi. Control of Zhaiwa concealed mass of rock on peripheral silver polymetallic deposits in west Henan[J]. Mineral Resources and Geology, 2004, 18(1):31-34(in Chinese with English abstract).
- [41] Chi Guoxiang, Ni Pei. Equations for calculation of NaCl/(NaCl + CaCl₂) ratios and salinities from hydrohalite-melting and ice-melting temperatures in the H₂O-NaCl-CaCl₂ system [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(01):33-37.
- [42] Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions[J]. Econ Geol, 1988, 83:197-202.
- [43] Xu G. Fluid inclusions with NaCl-CaCl₂-H₂O composition from the Cloncurry hydrothermal system, NW Queensland, Australia[J]. Lithos, 2000, 53:21-35.
- [44] 刘斌, 段光贤. NaCl-H₂O 溶液等容式及其应用 [J]. 矿物学报, 1987, 7(4):345-351.
Liu Bin, Duan Guangxian. The density and isochoric formulae for NaCl-H₂O fluid inclusions and their applications[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1987, 7(4):345-351 (in Chinese with English abstract).
- [45] Bischoff J L. Densities of liquids and vapors in boiling NaCl-H₂O solutions: A PVTX summary from 300°C to 500°C[J]. Amer J Sci, 1991, 291:309-338.
- [46] Hardie L A. Origin of CaCl₂ brines by basalt-seawater interaction: insights provided by some simple mass balance calculations [J]. Contrib Mineral Petrol, 1983, 82:205-213.
- [47] 韩以贵, 张世红, 白志达, 等. 豫西地区熊耳群火山岩钠长石化研究及其意义[J]. 矿物岩石, 2006, 26(1):35-42.
Han Yigui, Zhang Shihong, Bai Zhida, et al. Albitization of the volcanic rocks of the Xiong'er Group, Western Henan, and its implications [J]. J Mineral Petrol, 2006, 26(1):35-42 (in Chinese with English abstract).
- [48] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004:487.
Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, et al. Fluid Inclusion [M]. Beijing: Science Press, 2004:487(in Chinese).

Fluid inclusion constraints on the origin of the Zhaiwa Mo deposit, Luoning county, Henan Province

DENG Xiao-Hua¹, CHEN Yan-Jing¹, YAO Jun-Ming²,
Li Wen-Bo¹, LI Nuo¹, WANG Yun¹, MI Mei², ZHANG Ying²

(1. Laboratory of Orogen and Crust Evolution, Peking University, Beijing 100871, China;

2. KLMD, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: The Zhaiwa Mo deposit, in Luoning county, Henan province, is located in the Xiong'er Terrane in southern margin of North China Craton. Its ore bodies, occurring as lode, are hosted in biotite-amphibole-plagiogneiss of the Taihua Group and controlled by subsidiary faults of the Machaying fault which is the south boundary fault of the Xiong'er terrane. Three stages of hydrothermal ore-forming process are recognized, Quartz-molybdenite (I), which is the main metallogenic stage, Quartz-polymetallic sulfide (II) and Quartz-carbonate (III). Two types of fluid inclusions, i.e. H₂O-NaCl, daughter mineral-bearing, are observed. Laser-Raman spectrum showing that the most important component of fluid inclusion is water. From early to late stages, homogeneous temperatures of fluid inclusions change from 100~260 °C (I), through 110~160°C (II), to 120~180°C (III), this showing that the Zhaiwa Mo deposit belongs to low-temperature hydrothermal deposit; salinities change from 2~25 wt%NaCl.eqv (I), through 6~30 wt%NaCl.eqv (II), and to 7~25 wt%NaCl.eqv(III). The broad range of homogeneous temperatures of stage I, the evolution of salinities from bimodal to unimodal, and negative correlation between homogeneous temperatures and salinities indicate that fluid mixing is the most important metallogenic mechanism in Zhaiwa Mo deposit. The characteristic of fluid inclusion in Zhaiwa Mo deposit are high density, high salinities and low temperature, which is the result of CaCl₂-bearing fluid involved in ore forming process, the mixing of hot magmatic fluid and cold CaCl₂-bearing brine result to precipitation of molybdenite. In summary, The geological and fluid inclusions features of the Zhaiwa Mo deposit are similar to intrusion-related deposit, we affirm that the Zhaiwa Mo deposit is a intrusion-related Mo deposit.

Key words: Zhaiwa Mo deposit; ore geology; Fluid inclusion; Intrusion-related deposit; Eastern Qinling orogen

About the first author: DENG Xiao-hua, male, born in 1984, doctoral students, majored in ore deposit geology; E-mail: dxh198411@126.com.

About the Corresponding author: CHEN Yan-Jing, male, born in 1962, professor, his research interests include regional metallogeny, geology and geochemistry of ore deposits; E-mail: yjchen@pku.edu.cn; gigyjchen@126.com.