

湘东南太和仙铅锌矿床流体包裹体研究

carbon-aqueous two-phase inclusions (type II), and carbon-aqueous three-phase inclusions (type III). Microthermometric data show that the homogenization temperatures of the fluid inclusions from the early stage to the late stage are gradually decreased, from 235 ~ 349°C, through 159 ~ 272°C to 128 ~ 205°C, with the corresponding salinities being 2.03% ~ 7.44%, 1.39% ~ 10.86%, and 1.39% ~

等,2011);第3期燕山晚期花岗岩(白云母 K-Ar 年龄,136~110 Ma; 宋新华等,1988)。不同期次岩浆

的多次侵入,导致了该区成矿的多期次及特征的多样性。

</

2 矿床地质特征

太和仙矿区位于邓阜仙矿田的西部,多期构造-岩浆活动叠加改造强烈。矿床整体产于太和仙复式背斜内,其东南部可见区域性茶(陵)-郴(州)断裂,

因矿床,可以分为3个成矿阶段:①石英-黄铁矿-毒砂阶段(早阶段),主要为含黄铁矿、毒砂石英脉。金属矿物为黄铁矿、毒砂,其中部分黄铁矿发生毒砂化。脉石矿物以石英为主。该阶段金属矿物呈条带状、浸染状、块状产出。②石英-铅锌多金属硫化物阶段(中阶段)。该阶段以铅锌矿、方铅矿为主,其次为黄铁矿、毒砂、黄铜矿;脉石矿物为石英。该阶段

金属矿物中闪锌矿、方铅矿、黄铜矿熔蚀交代毒砂及黄铁矿,闪锌矿与黄铜矿呈固溶体结构,矿石主要呈条带状、浸染状产出。③石英-方解石-黄铁矿阶段(晚阶段),主要为含黄铁矿的方解石石英脉,金属矿物为黄铁矿,脉石矿物以石英为主,方解石次之。该阶段黄铁矿主要呈半自形-它形粒状结构,矿石主要成浸染状产出。

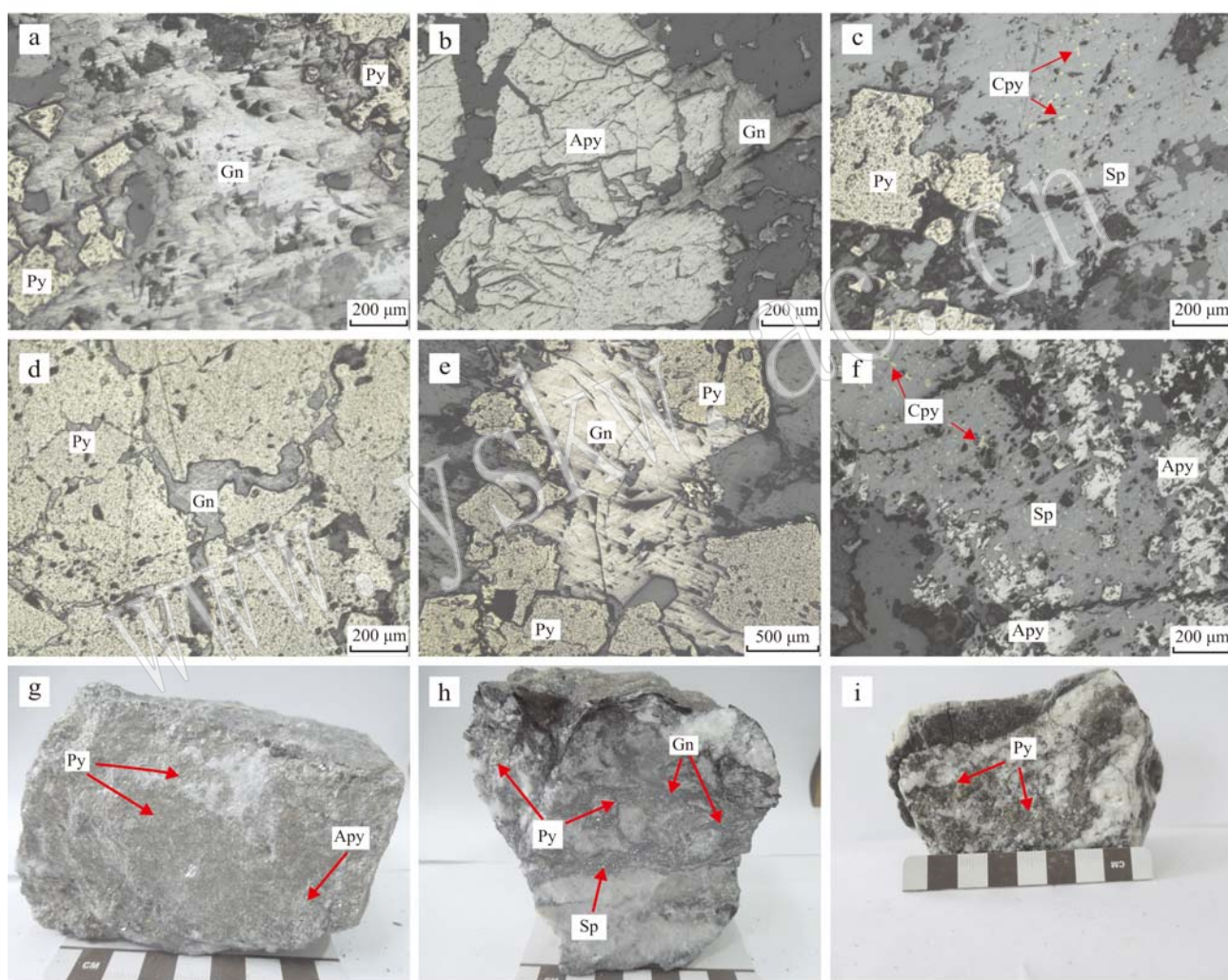


图3 太和仙矿床典型矿石结构构造照片(-)

Fig. 3 Photographs of typical structures and textures of ores from the Taihexian deposit(-)

a—方铅矿包含黄铁矿; b—毒砂交代溶蚀结构; c—闪锌矿与黄铜矿呈固溶体结构,交代黄铁矿; d—方铅矿沿黄铁矿裂隙充填,呈充填结构; e—黄铁矿呈交代残余结构; f—闪锌矿与黄铜矿呈固溶体结构,毒砂呈交代残余结构; g—早阶段致密块状毒砂黄铁矿矿石; h—中阶段条带状黄铁矿闪锌矿方铅矿矿石; i—晚阶段浸染状黄铁矿矿石; Py—黄铁矿; Apy—毒砂; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Cpy—黄铜矿
a—galena containing pyrite; b—metasomatic dissolution textures in arsenopyrite; c—solid solution textures of sphalerite-chalcopyrite, metasomatic dissolution textures in pyrite; d—intersertal texture in galena; e—metasomatic dissolution textures in pyrite; f—metasomatic dissolution textures in arsenopyrite; g—early stage massive arsenopyrite-pyrite ore; h—middle stage banded pyrite-sphalerite-galena ore; i—late stage pyrite ore; Py—pyrite; Apy—arsenopyrite; Sp—sphalerite; Gn—galena; Cpy—chalcopyrite

3 样品采集和测试方法

本次研究的样品采集于邓阜仙矿田的太和仙矿床。分别磨制了石英-黄铁矿-毒砂阶段(早阶段)包裹体片3件,石英-铅锌多金属硫化物阶段(中阶段)包裹体片5件,石英-方解石-黄铁矿阶段(晚阶段)包裹体片2件。具体采样情况如下表1所示。依次开展了流体包裹体岩相学、显微测温及激光拉曼探针研究。

包裹体显微测温工作中南大学地球科学与信息物理学院的包裹体实验室完成。选用英国生产的 Linkam THMSG 600 型显微测温冷热台进行测温实验。仪器测温范围为 $-196 \sim 600^{\circ}\text{C}$, 在测温过程中, $-196 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 测温精度为 0.1°C ; $0 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 测温精度为 0.5°C ; $30 \sim 196^{\circ}\text{C}$ 测温精度为 1°C 。激光拉曼成分分析工作在中国科学院广州地球化学研究所完成。选用英国生产的 Renishaw-2000 型显微激光拉曼仪进行实验。仪器激光波长为 514 nm , 激光束斑 $1 \sim 2\text{ }\mu\text{m}$, 激光功率 20 mW , 曝光时间 30 s , 扫描2次, 拉曼位移波数采用单晶硅标准。

表1 邓阜仙矿区太和仙矿床包裹体样品采集位置

Table 1 Sampling location of Taihexian deposit

样品编号	取样位置	岩性	成矿阶段
Thx-08	主矿井 658 m	含黄铁矿石英脉	早阶段
Thx-10	主矿井 658 m	条带状黄铁毒砂矿化石英脉	早阶段
Thx-15	副矿井 705 m	星点状黄铁矿石英脉	早阶段
Thx-01	主矿井 658 m	条带状黄铁矿闪锌矿方铅矿石英脉	中阶段
Thx-03	主矿井 658 m	含条带状黄铁矿闪锌矿方铅矿石英脉	中阶段
Thx-05	主矿井 658 m	含方铅矿黄铁矿石英脉	中阶段
Thx-07	主矿井 658 m	含黄铁矿石英脉	中阶段
Thx-13	副矿井 705 m	含条带状黄铁毒砂方铅矿石英脉	中阶段
Thx-09	主矿井 658 m	萤石方解石石英脉	晚阶段
Thx-16	副矿井 705 m	浸染状黄铁矿化方解石石英脉	晚阶段

4 流体包裹体

4.1 流体包裹体岩相学

根据室温条件下包裹体的相态特征及冷冻回温过程中包裹体相态变化(卢焕章等, 2004), 可将太和仙矿床流体包裹体分为富液相水溶液包裹体(Ia型)、富气相水溶液包裹体(Ib型)、两相 CO_2 包裹体(II型)、三相 CO_2 水溶液包裹体(III型)4类:

I型(Ia型+Ib型): 水溶液包裹体, 在室温下, Ia型为富液相包裹体(如图4a、4b、4c、4d), Ib型为富气相包裹体(如图4a、4b), 部分为纯液相, 未发现含子矿物包裹体。Ia型包裹体气液占比一般为 $10\% \sim 50\%$, 加热均一至液相。Ib型包裹体气液占比 $> 50\%$, 集中于 $55\% \sim 70\%$, 加热均一至液相。包裹体形态多为椭圆形、负晶形或不规则形, 大小为 $2 \sim 29\text{ }\mu\text{m}$ 。该类包裹体在矿床的整个阶段均有出现, 占整个包裹体总量的 80% 以上。此外, 还存在少量的次生包裹体(如图4f), 常沿切穿主矿物晶体的愈合裂隙分布, 大小一般小于 $4\text{ }\mu\text{m}$ 。

II型: CO_2 包裹体(如图4e), 由气相 CO_2 和液相 CO_2 组成, 室温下仅见单相(V_{CO_2})或两相($V_{\text{CO}_2} + L_{\text{CO}_2}$)。其气液占比为 $12\% \sim 40\%$, 分布不均匀, 形态多为椭圆形或不规则形, 长轴长度 $5 \sim 9\text{ }\mu\text{m}$ 。此类包裹体发育较少, 仅见于中阶段石英脉中。

III型: 含 CO_2 的三相水溶液包裹体(如图4d), 在室温下通常呈三相($V_{\text{CO}_2} + L_{\text{CO}_2} + L_{\text{H}_2\text{O}}$)。其 CO_2 气液占比为 $40\% \sim 90\%$, 呈椭圆形或不规则形, 长轴长度 $5 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 。该类包裹体数量较少, 仅出现于早阶段石英脉中。

4.2 流体包裹体显微测温

分别选取了太和仙矿床3个阶段矿石中的10件样品磨制了测温片, 对其进行了显微测温分析, 测试的矿物包括石英和方解石。对各阶段的流体包裹体均一温度通过升温至单相获取。主要通过 Hall 等(1988)发现的流体包裹体盐度-冰点计算方程和 Bodnar(1993)的盐度-冰点关系表得出 I 型包裹体的盐度; 利用 Collins(1979)提出的 $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ 笼合物融化温度与盐度计算方法得出 III 型包裹体的盐度。流体密度主要通过 Flintcor 软件(Brown, 1989)测得各类型包裹体密度。本次测试数据及计算结果见表2, 并对各阶段均一温度及盐度绘制了直方图(图5)。现将各阶段测试分述如下。

早阶段即石英-黄铁矿-毒砂阶段, 测试的脉石矿物主要为石英。原生包裹体以 I 型包裹体为主, 含少量 III 型包裹体。其中 I 型包裹体共测试了 Ia 型与 Ib 型包裹体, Ia 型包裹体测得均一温度集中分布在 $235 \sim 335^{\circ}\text{C}$, 计算的盐度变化范围 $2.56\% \sim 7.44\%$ (NaCl_{eq} , 质量分数, 下同); Ib 型包裹体测得均一温度集中分布在 $310 \sim 349^{\circ}\text{C}$, 计算的盐度变化范围 $5.09\% \sim 5.70\%$ 。通过计算得出的 I 型包裹体

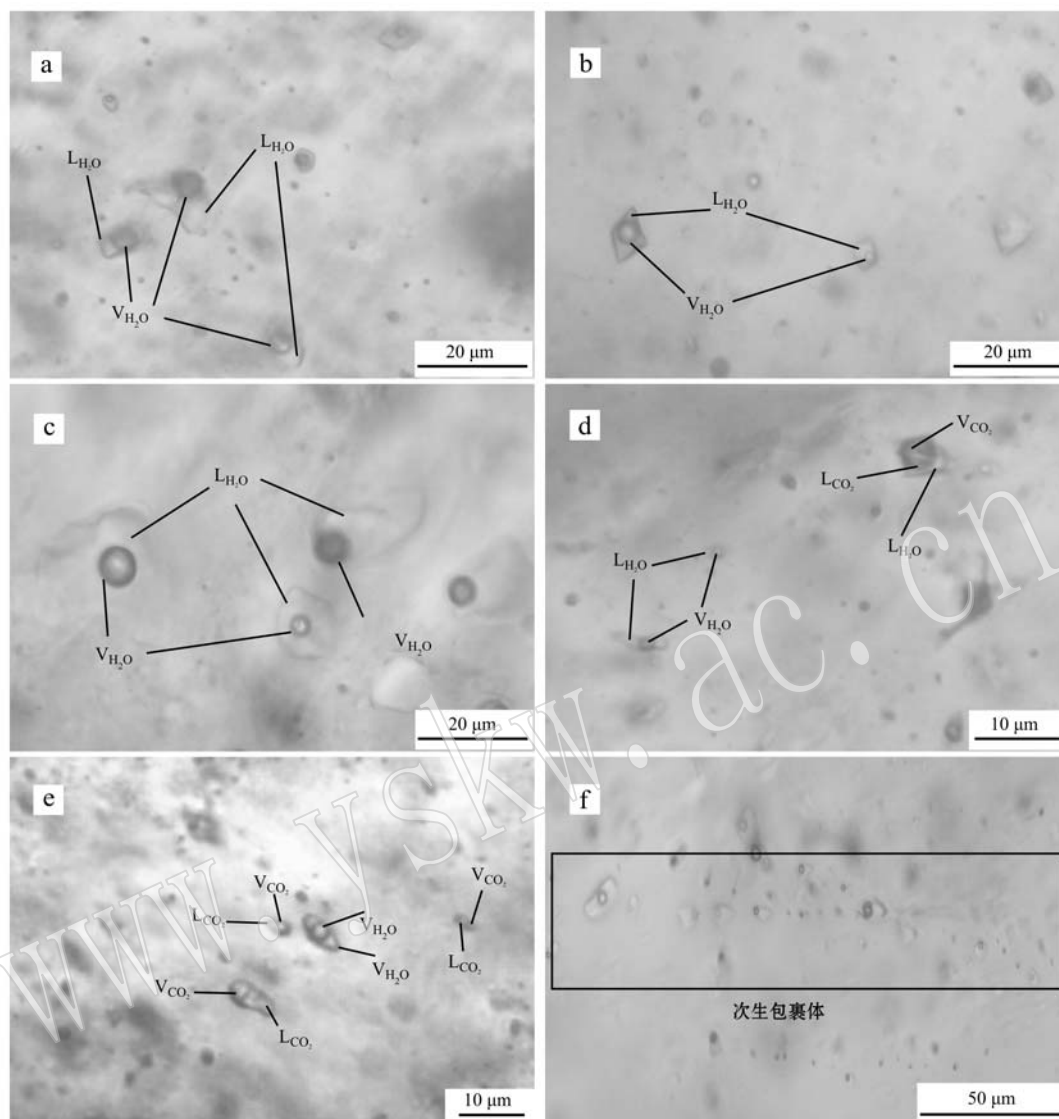


图4 各类型流体包裹体显微照片

Fig. 4 Fluid inclusions of different types in the Taihexian deposit

a—Ia 型包裹体及 Ib 型包裹体; b—Ia 型包裹体及 Ib 型包裹体; c—Ia 型包裹体; d—Ⅲ型包裹体及 Ia 型包裹体; e—Ⅱ型包裹体;
f—次生包裹体

a—Ia type and Ib type fluid inclusions; b—Ia type and Ib type fluid inclusions; c—Ia type fluid inclusions; d—Ⅲ type and Ia type fluid inclusions; e—Ⅱ type fluid inclusions; f—secondary inclusion

流体密度变化大小为 $0.70 \sim 0.86 \text{ g/cm}^3$ 。其次, Ⅲ型包裹体在测温过程中测得固相 CO_2 的三相点温度为 $-58.6 \sim -56.9^\circ\text{C}$, 相对低于纯 CO_2 三相点 (-56.6°C), 表明 Ⅲ型包裹体中除含有 CO_2 气相成分外还可能含有其他气相成分存在, 在之后的激光拉曼探针测试中也证实了这一点。在包裹体测试升温阶段, 笼合物消失温度范围为 $7.5 \sim 8.6^\circ\text{C}$, 均一温度集中分布在 $305 \sim 335^\circ\text{C}$, 计算的盐度变化范围 $2.03\% \sim 4.87\%$ 。

中阶段即石英-铅锌多金属硫化物阶段, 测试的脉石矿物为石英。原生包裹体以 Ia 型为主, 其次含少量 Ⅱ型包裹体。Ia 型包裹体测得均一温度集中分布在 $159 \sim 272^\circ\text{C}$, 计算的盐度变化范围 $1.39\% \sim 10.86\%$, 流体密度变化大小为 $0.81 \sim 0.96 \text{ g/cm}^3$ 。Ⅱ型包裹体测温的冷冻回温过程中, 测得三相点温度为 $-58.9 \sim -57.1^\circ\text{C}$, 大致分布在纯 CO_2 三相点附近。继续升温, 测得部分均一温度集中分布在 $24.5 \sim 29.7^\circ\text{C}$, 计算的流体密度变化大小为 $0.65 \sim$

表 2 太和仙矿床流体包裹体显微测温结果
Table 2 Thermometric experimental data of fluid inclusions from the Taihexian deposit

成矿阶段	主矿物	类型	频数	大小/ μm	气液比/%	二氧化碳溶 化温度/ $^{\circ}\text{C}$	冰点温度/ $^{\circ}\text{C}$	二氧化碳笼和 物熔化温度/ $^{\circ}\text{C}$	二氧化碳部分 均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	盐度/%	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
石英-黄铁矿-毒 砂阶段	石英	I a	37	4.5~19.6	10~50	-4.7~-1.9	-3.5~-3.1	7.5~8.6	25.5~30.8	235~336	2.56~7.44	0.70~0.86
		I b	8	5.1~8.8	55~70					310~349	5.09~5.70	
		III	8	5.7~9.3	40~90					305~335	2.03~4.87	
石英-铅锌多金 属硫化物阶段	石英	I a	59	2.7~12.2	10~50	-7.3~-0.8	-58.9~-57.1	24.5~29.7		159~272	1.39~10.86	0.81~0.96
		II	4	5.2~8.9	12~40							0.65~0.74
石英-方解石-黄 铁矿阶段	石英	I a	24	2.7~28.9	10~30	-4.8~-0.8				128~205	2.06~7.58	0.89~0.97
		I a	17	3.6~10.6	10~25					129~172	1.39~3.05	

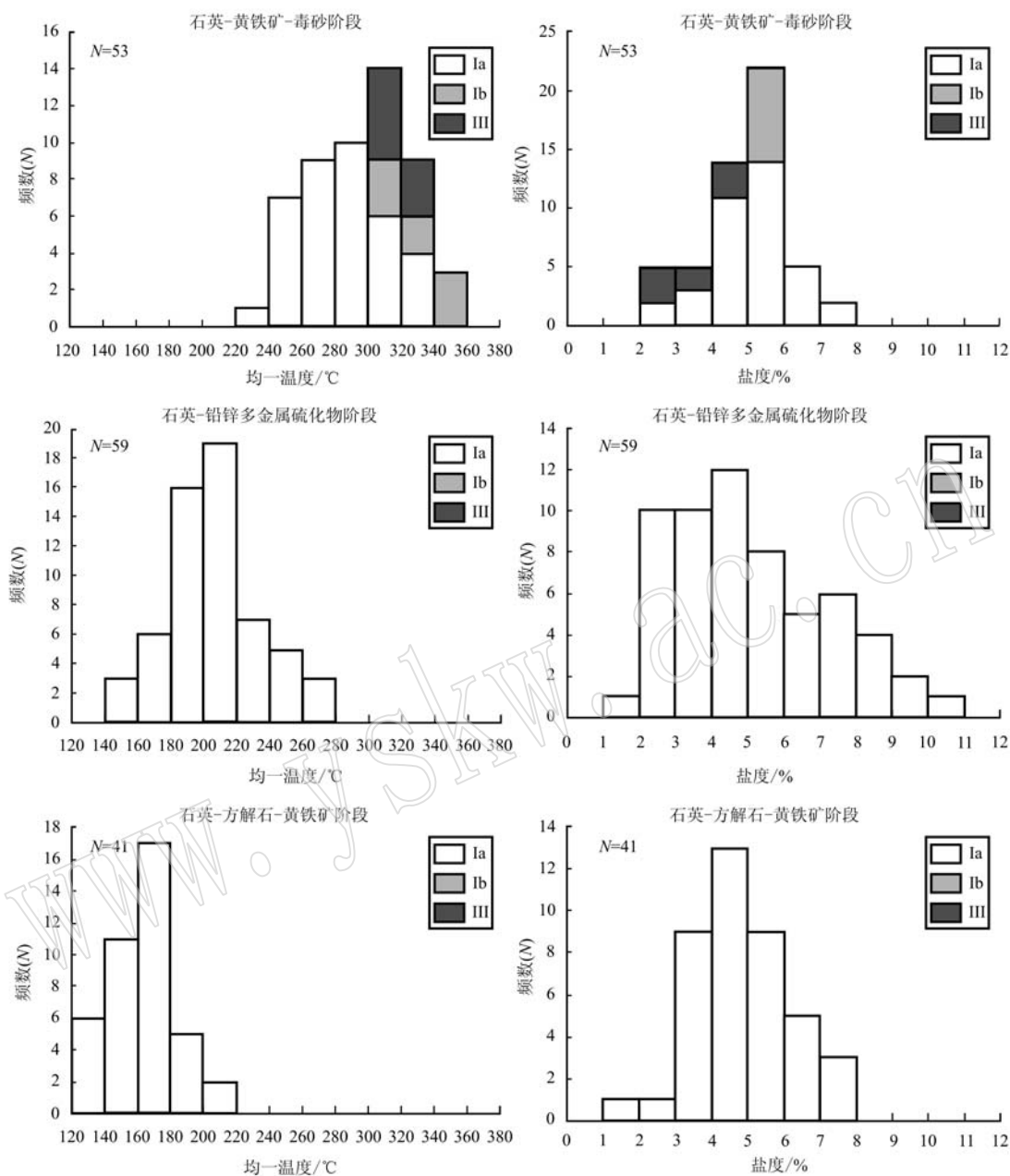


图5 各阶段流体包裹体均一温度及盐度直方图

Fig. 5 Histogram of homogenization temperature and salinity in fluid inclusions from the Taihexian deposit

0.74 g/cm³。

晚阶段即石英-方解石-黄铁矿阶段,测试的脉石矿物为石英与方解石。原生包裹体为Ia型包裹体,其测得的均一温度集中分布在128~205℃,计算的盐度变化范围1.39%~7.58%,流体密度变化大小为0.89~0.97 g/cm³。

4.3 流体包裹体的激光拉曼探针分析

激光拉曼探针分析,显示太和仙矿床的3个阶段的不同类型包裹体的谱线特征存在差异,在气相

成分及含量上均有所不同。在早阶段中,I型包裹体可检测到相对高强度的H₂O的特征峰,还可见较弱的CO₂谱峰出现(图6a)。III型包裹体除具有明显的水峰外,均检测到不同程度的CO₂,及还原性气体CH₄和N₂,其中CO₂峰值具有相对较高的强度(图6b)。在中阶段中,I型包裹体仅检测到H₂O,无其他成分特征峰出现(图6c)。II型包裹体中有H₂O及CO₂等较强信号的成分外,还检测出较弱的CH₄(图6d)。中阶段相对于早阶段气相成分种类及

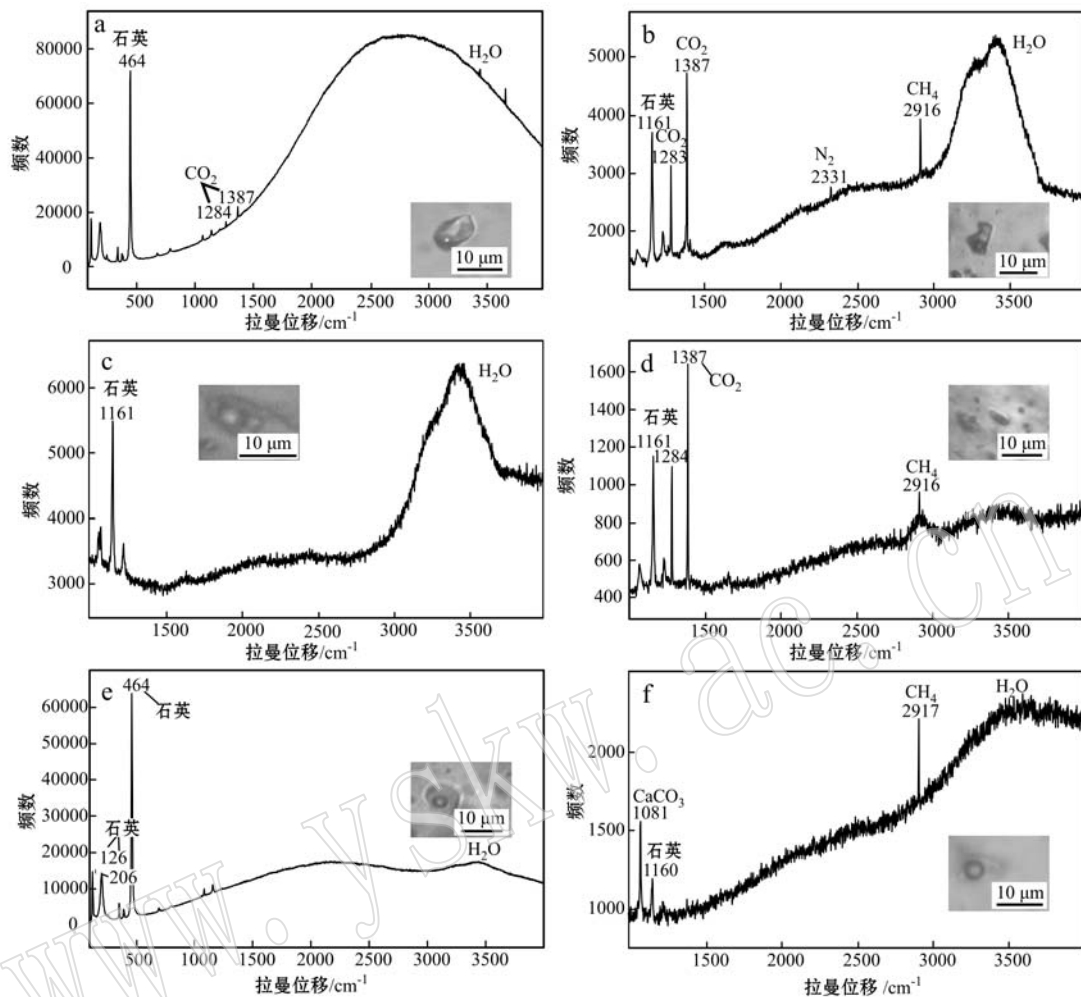


图6 邓阜仙矿区太和仙矿床流体包裹体激光拉曼图谱

Fig. 6 Raman spectra of fluid inclusions in hydrothermal veins of the Taihexian deposit

a—早阶段 Ib 型包裹体; b—早阶段 III 型包裹体; c—中阶段 Ia 型包裹体; d—中阶段 II 型包裹体; e—晚阶段 Ia 型包裹体; f—晚阶段 Ia 型包裹体

a—Ib type fluid inclusion of early stage; b—III type fluid inclusion of early stage; c—Ia type fluid inclusion of middle stage; d—II type fluid inclusion of middle stage; e—Ia type fluid inclusion of late stage; f—Ia type fluid inclusion of late stage

含量明显减少。在晚阶段中, I 包裹体均未检测出 CO_2 气相成分, 除 H_2O 外, 仅可检测出 CH_4 谱峰(图 6e, 6f)。

4.4 成矿压力和成矿深度估算

本文采用卢焕章等(2004)提出的利用 H_2O 和 CO_2 体系构建的联合 p - t 图解, 在流体包裹体岩相学观察中同一平面内的纯 H_2O 包裹体与纯 CO_2 包裹体, 具有同时捕获的特征, 并通过测试测得纯 H_2O 包裹体(纯 H_2O 包裹体可选取盐度 $< 5\%$ 的 I 型包裹体)与纯 CO_2 包裹体的流体密度在图解中的表达来获取可能的成矿压力范围。通过对少数与 II 型包裹体共生在同一平面内的 I 型包裹体(盐度 $< 5\%$)进行流体密度计算, 测得流体密度为 $0.83 \sim 0.94 \text{ g/cm}^3$, 以此表示纯 H_2O 包裹体流体密度; 纯 CO_2 包

裹体则由 II 型包裹体表示, 其流体密度变化范围为 $0.67 \sim 0.73 \text{ g/cm}^3$, 并将两类流体包裹体的流体密度投图在 p - t 图上(图 7), 捕获到的压力为 $47 \sim 120 \text{ MPa}$ 。按照静岩压力公式 [$H = p/\rho g$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$] 计算成矿深度, 其中矿区围岩密度 ρ 选用大陆岩石平均密度, 为 2.70 g/cm^3 。采用捕获的最高压力估算太和仙矿床成矿的最大深度为 4.53 km 。

5 讨论

5.1 成矿流体性质

流体包裹体测试结果表明, 太和仙矿床各阶段成矿流体温度变化于 $128 \sim 349^\circ\text{C}$ 之间, 流体盐度范

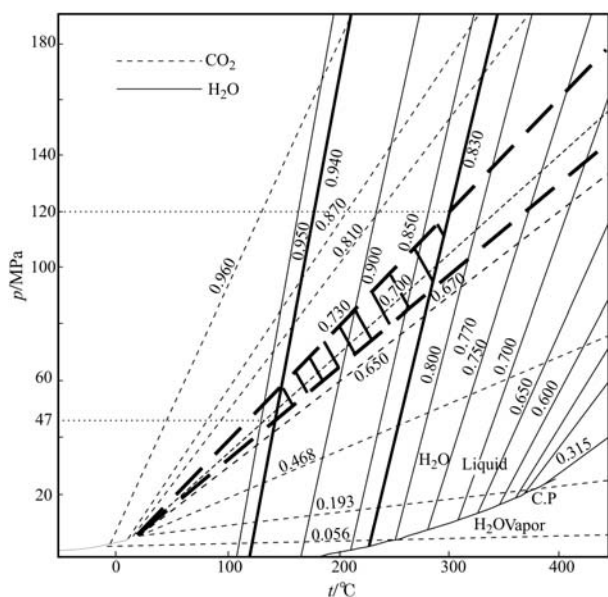


图7 H₂O和CO₂体系联合 p - t 图解(图中数据为密度, g/cm^3 , 据 Roedder and Bodnar, 1980)

Fig. 7 p - t diagrams of H₂O-CO₂ system (data in the diagram is the density of H₂O or CO₂, g/cm^3 , modified after Roedder and Bodnar, 1980)

围为 1.39% ~ 10.86%, 流体密度介于 0.65 ~ 0.97 g/cm^3 之间。各阶段由于捕获的流体包裹体类型及成分均有所差异, 且在均一温度、盐度、密度测试结果上的不同, 故表明各阶段成矿性质具有一定的变化规律。现对各阶段成矿流体变化规律总结如下。

均一温度从早阶段至晚阶段依次为: 235 ~ 349°C、159 ~ 272°C、128 ~ 205°C, 可见流体温度逐渐降低; 流体盐度均值从早阶段至晚阶段依次为: 5.13%、5.07%、4.73%, 呈现出微弱下降的趋势; 流体密度从早阶段 0.70 ~ 0.86 g/cm^3 , 经中阶段 0.81 ~ 0.96 g/cm^3 到晚阶段 0.89 ~ 0.97 g/cm^3 , 整体表现出上升的趋势, 可能与流体中气相成分逸失有关。结合激光拉曼探针分析结果表明, 早阶段成矿流体具有多种气相成分, 且富 CO₂, 过渡至中阶段, 流体中气相成分明显减少, 且 CO₂ 含量低于早阶段, 晚阶段未见 CO₂ 等气相成分, 局部含少量 CH₄。从而推测由于从早阶段至晚阶段, 成矿流体中气相成分逸失导致了流体密度逐渐升高。

通过对太和仙矿床 3 个阶段在均一温度、盐度、密度、成分等方面变化规律总结, 可知早阶段成矿流体具有中-高温、低盐度特征, 流体体系为 NaCl-CO₂-H₂O 体系; 中阶段具有中-低温特征, 流体体系为

NaCl-CO₂-H₂O 体系; 晚阶段具有低温、低盐度特征, 流体体系为 NaCl-H₂O 体系。

5.2 成矿流体演化

在成矿作用过程中, 成矿流体不仅是成矿物质搬运的媒介, 同时也是能量的传导者 (Wilkinson, 2001; Li *et al.*, 2013)。气水热液矿床的形成与热液活动密切相关, 其成矿过程实质上就是热液把深部的矿质及岩石中的成矿元素萃取出来, 在搬运过程中经一系列成矿作用发生沉淀聚集的过程 (袁见齐等, 1985; Deng *et al.*, 2009; 邓军等, 2012)。

在早阶段中, 流体包裹体类型主要为 I 型包裹体与 III 型包裹体。在该阶段中可见有 I 型、III 型包裹体 3 类包裹体共生在一个平面内, 而且没有任何岩相学证据显示它们是不同期次所捕获的, 说明了在包裹体被捕获期间被捕获的流体的不均一, 反映了流体曾经历了流体不混溶过程; 其次, 据上述的流体包裹体测试及投图结果, I 型包裹体均一温度峰值为 300°C, 盐度峰值为 5.00%; III 型包裹体均一温度峰值为 315°C, 盐度峰值为 2.5%。可以看出, I 型包裹体均一温度低于 III 型包裹体, 相反盐度明显较 III 型包裹体高说明该阶段捕获前的流体可能发生了不混溶作用 (Shepherd and Rakin, 1985), 其中 I 型与 III 型包裹体均一温度偏差值 $[(T_1 - T_2)/T_1 = 0.05 < 0.1]$ (T_1 代表 I 型包裹体的平均均一温度; T_2 代表 III 型包裹体的平均完全均一温度), 说明了它们是同时期捕获的 CO₂-低盐水不混溶流体包裹体组合。最后, 同一视域中见到的 I 型包裹体与 III 型包裹体进行了包裹体测温, 它们具有相近的均一温度, 进一步说明了包裹体中流体是原始均一流体发生不混溶作用的结果 (刘丽等, 2012)。且在激光拉曼探针成分测试中, 该阶段 III 型包裹体中检测出 CH₄ 的特征峰, 结合已有研究表明, 在 NaCl-H₂O-CO₂ 流体体系中混入 CH₄ 组分, 可能反映流体在深部运移时, 曾发生过不混溶事件 (Naden and Shepherd, 1989)。该阶段中 I 型与 III 型包裹体存在盐度的差异, 可能由于在流体发生不混溶时, 体系内的压力和温度的降低, 造成流体中的 CO₂ 等气相成分逸失, 导致 I 型包裹体盐度升高 (王旭东等, 2012; 熊伊曲等, 2016; Xiong *et al.*, 2017)。通过将早阶段各类型包裹体的均一温度、盐度进行投图 (图 8), 可见该阶段流体明显发生了不混溶作用。

相对于早阶段的流体包裹体, 中阶段流体包裹体中主要为 I 型包裹体及少量的 II 型包裹体。该

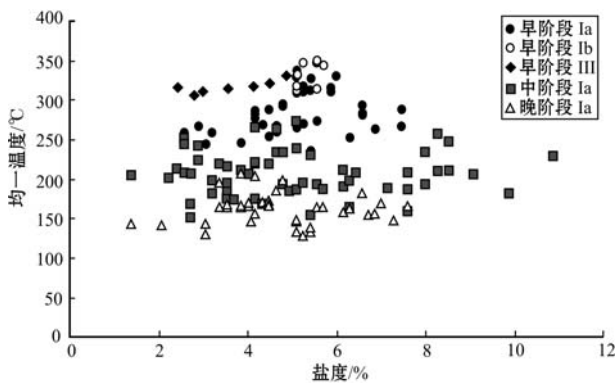


图8 各阶段流体包裹体均一温度-盐度关系图

Fig. 8 Plot of salinity versus homogeneous temperature fluid inclusions of different stages

阶段主要研究的是Ⅰ型包裹体,其盐度为1.39%~10.86%,分布范围较大;均一温度为159~272℃,与盐度之间呈轻微的负相关,随着均一温度的升高,盐度则相反呈现出轻微降低的趋势(图7),显示流体具有一定的混合特征,说明了流体可能在演化过程中发生了中高温、低盐度的流体与大气降水及层间水的混合作用,导致了该阶段流体温度下降明显,盐度呈略微降低趋势。结合前人的研究成果也进一步证实了流体混合作用的发生。杨毅(2014)通过对邓阜仙钨矿床流体包裹体研究,认为成矿流体都发生了混合作用。熊伊曲(2017)通过对太和仙矿床进行H-O同位素研究,发现该矿床成矿流体存在多种来源,包括岩浆水、大气降水及层间变质水,其次在S-Pb同位素研究中发现成矿物质硫存在多种来源,认为该矿床发生了一定的流体混合作用。

而晚阶段流体包裹体中并未见含CO₂包裹体,既无Ⅱ型包裹体,也未见Ⅲ型包裹体,整体均一温度及盐度均低于前两阶段,推测流体主体可能以大气降水为主,且流体中成矿元素富集沉淀成矿的过程可能是流体自然冷却的过程。

研究表明,太和仙铅锌矿床成矿流体演化过程中均一温度、流体盐度、流体密度表现出一定的规律性,流体中气液相组分从早到晚阶段发生明显变化,气相组分明显减少,越往后受大气降水的影响越大。总体上讲,早阶段成矿流体在演化过程中发生了流体的不混溶作用,主要表现在以CO₂等气相组分的逸失,导致流体中金属元素富集沉淀;中阶段成矿流体演化过程中主要以大气降水及层间水混入,发生不同流体间的混合作用,导致流体中大量金属元素

在该阶段沉淀成矿,该阶段也是主要的成矿阶段;晚阶段成矿流体主体可能为大气降水,由于大量大气降水的混入,推测该阶段流体可能因自然冷却致金属元素沉淀。

5.3 成矿机制探讨

太和仙铅锌矿床的流体包裹体研究表明,该矿床成矿期次为石英-黄铁矿-毒砂阶段(早阶段)、石英-铅锌多金属硫化物阶段(中阶段)、石英-方解石-黄铁矿阶段(晚阶段),且3个阶段具有不同的演化过程,并由此引起成矿元素沉淀成矿的方式不同。在太和仙矿区东部出露邓阜仙复式岩体,且张雄等(2015)通过物化探异常研究,推测矿区处于隆起的强热液活动区,下伏可能存在一隐伏岩体,认为成矿与邓阜仙复式岩体密切相关。同时,该矿床由于受到印支期到燕山期岩浆的多次入侵,导致区内褶皱和断裂构造发育,也为矿区成矿提供充足的动力和成矿流体。热液早阶段流体中金属元素沉淀富集可能是由于邓阜仙燕山早期岩浆活动在封闭的体系中形成具有较大内压的含矿流体,在岩浆期后热动力影响下,不断向低压的裂隙环境运移。在流体沿裂隙通道运移过程中,不断与周围环境接触,自身热能不断损耗,温度、压力及成分发生改变,成矿流体运移过程中发生了一定的不混溶作用,表现为以CO₂等气相组分逸失。由于CO₂等气体组分的逸失导致剩余流体浓度升高,流体中并无有用的金属离子或络合物分解沉淀成矿,此时流体中Fe²⁺、As³⁺等金属阳离子与流体中S²⁻结合形成了黄铁矿及毒砂。热液中阶段流体由于早期初始岩浆热液常具有高温、高氧逸度及高碱金属离子含量,通过流体运移,不断活化-萃取围岩中的Pb、Zn等成矿元素,使流体体系中混入了大量的有用金属成矿元素(Hedenquist and Lowenstern, 1994; Heinrich, 2005)。在流体不断运移过程中,能量不断损耗,且与周围环境的接触,伴随大气降水及层间水的混合引起流体系统的物理化学条件的不断改变,同时金属络合物分解,Fe²⁺、Cu²⁺、As³⁺、Pb²⁺、Zn²⁺、S²⁻等离子在有利的构造地段沉淀成矿。热液晚期流体中大量金属成矿离子已在前两个阶段中沉淀成矿,仅剩残余Fe²⁺,此时流体经过长距离的运移,由于大量大气降水混入,流体的主体可能以大气降水为主。推测流体由于自身热能损耗较大,温度、压力不断降低,最后可能经历自然冷却导致金属元素沉淀。

6 结论

(1) 太和仙铅锌矿床属于热液成因矿床, 成矿阶段可以分为3个阶段, 依次为石英-黄铁矿-毒砂阶段(早阶段)、石英-铅锌多金属硫化物阶段(中阶段)、石英-方解石-黄铁矿阶段(晚阶段)。

(2) 流体包裹体研究表明, 早阶段包裹体以 I 型为主, 其中 Ia 型最为发育, Ib 型与 III 型包裹体均少见, 其中高温(243 ~ 349℃)、低盐度(盐度均值 5.13%) NaCl-H₂O-CO₂ 流体体系; 中阶段发育的包裹体主要为 Ia 型, II 型包裹体少见, 其中低温(159 ~ 272℃)、低盐度(盐度均值 5.07%) NaCl-H₂O-CO₂ 流体体系; 晚阶段仅发育 Ia 型包裹体, 其中低温(128 ~ 205℃)、低盐度(盐度均值 4.73%) NaCl-H₂O 流体体系。结合捕获的纯 H₂O 与纯 CO₂ 组分进行投图所获得成矿压力为 47 ~ 120 MPa, 利用成矿最大压力估算成矿深度上限为 4.53 km。

(3) 太和仙矿区石英-黄铁矿-毒砂阶段(早阶段)的成矿流体在演化过程中发生了不混溶作用, 表现为 CO₂ 等气相成分的逸失是导致金属元素沉淀富集的主要因素。石英-铅锌多金属硫化物阶段(中阶段)的成矿流体在演化过程中发生了不同流体间的混合作用, 表现在大气降水及层间变质水的混入是导致大量金属元素沉淀成矿的主要因素。该阶段也是太和仙矿区铅锌矿的主成矿阶段。石英-方解石-黄铁矿阶段(晚阶段)中流体以大气降水为主, 推测可能流体自然冷却致使金属元素沉淀富集。

References

- Bai Daoyuan, Wang Xianhui, Ma Tieqiu, *et al.* 2006. Characteristics and forming mechanism of indosinian folds in the southeast Hunan [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 11(4): 50 ~ 57 (in Chinese with English abstract).
- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solution [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 57: 683 ~ 684.
- Brown P E. 1989. FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data [J]. *American Mineralogist*, 74: 1 390 ~ 1 393.
- Cai Wei, Zhu Haofeng, Guo Jin, *et al.* 2014. Ore-forming conditions and range of reconnaissance for polymetallic deposits in Dengfuxian, Hunan [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 34(4): 538 ~ 542 (in Chinese with English abstract).
- Cai Yang, Huang Hui and Xie Xu. 2010. Geological and geochemical characteristics of Dengfuxian tungsten deposit in Hunan Province [J]. *Mineral Deposits*, 29(S1): 1 067 ~ 1 068 (in Chinese).
- Cai Yang, Lu Jianjun, Ma Dongsheng, *et al.* 2013. Chronology and geochemical characteristics of Late Indosinian Dengfuxian two-micagranite in eastern Hunan Province, China, and its significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4 215 ~ 4 231 (in Chinese with English abstract).
- Cai Yang, Ma Dongsheng, Lu Jianjun, *et al.* 2012. Re-Os geochronology and S isotope geochemistry of Dengfuxian tungsten deposit, Hunan Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3 798 ~ 3 808 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zilong, Sun Zhenjia and Yang Chuxiong. 1991. Studies on the geological and geochemical features of Dengfuxian tungsten ore deposits and their origin [J]. *J. Cent. South Inst. Min. Metall.*, 22(2): 117 ~ 122 (in Chinese with English abstract).
- Collins P L F. 1979. Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity [J]. *Econ. Geol.*, 74: 1 435 ~ 1 444.
- Deng Jun, Wang Changming and Li Gongjian. 2012. Style and process of the superimposed mineralization in the Sanjiang Tethys [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1 349 ~ 1 361 (in Chinese with English abstract).
- 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 [J]. *Resource Geology*, 59(2): 140 ~ 152.
- Fan Hongrui, Jin Chengwei and Shen Yuanchao. 1998. Ore-forming fluid geochemistry of the Hatu gold deposit in Xinjiang, Northwest China [J]. *Mineral Deposits*, 17(2): 135 ~ 149 (in Chinese with English abstract).
- Fan Hongrui, Xie Yiyan, Zhai Mingguo, *et al.* 2003. A three stage fluid flow model for Xiaoqinling lode gold metallogenesis in the He'nan and Shanxi provinces, central China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 260 ~ 265 (in Chinese with English abstract).
- Hall D L, Sterner S M and Bodnar R J. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solution [J]. *Econ. Geol.*, 76: 1 344 ~ 1 355.
- Hedenquist J W and Lowenstern J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits [J]. *Nature*, 370(6 490): 519 ~ 527.
- Heinrich C A. 2005. The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: A thermodynamic study [J]. *Mineralium Deposita*, 39(8): 864 ~ 889.
- Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, *et al.* 2005. Metallogenesis

- and their geodynamic settings related to Mesozoic granitoids in the Nanling range[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 291 ~ 304 (in Chinese with English abstract).
- Huang Hongxin, Chen Zhenghui, Lu Yuanfa, *et al.* 2014. Zircon U-Pb dating for Xiangdong tungsten mineralization rocks and its geological significance[J]. *Journal of East China University of Science and Technology*, 37(1): 26 ~ 36 (in Chinese with English abstract).
- Huang Hui, Ma Dongsheng, Lu Jianjun, *et al.* 2011. Zircon U-Pb chronology of Dengfuxian granite in Hunan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(S1): 590 ~ 591 (in Chinese).
- Huang Hui, Ma Dongsheng, Lu Jianjun, *et al.* 2013. Zircon U-Pb geochronology characteristics of Dengfuxian two-mica granite, Eastern Hunan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(2): 245 ~ 255 (in Chinese with English abstract).
- Li G J, Wang Q F, Wang J Q, *et al.* 2013. Geological and geochemical characteristics of the Huangshilao stratabound gold deposit in the Tongguanshan orefield, Tongling, East-Central China[J]. *Resource Geology*, 63(2): 141 ~ 154.
- Liu Huanshu and Zhang Xueyuan. 1997. The discovery of the deep ore vein in Xiangdong tungsten deposit and the enlightenment of prospecting[J]. *China Tungsten Industry*, 12(1): 11 ~ 14 (in Chinese).
- Liu Li, Gu Xuexiang, Peng Yiwei, *et al.* 2012. Characteristics of fluid inclusions and fluid immiscibility mechanism of the Taipingdong gold deposit, Guizhou[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1 568 ~ 1 576 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, *et al.* 2004. *Fluid Inclusion*[M]. Beijing: Science Press, 1 ~ 450 (in Chinese).
- Lu Huanzhang, Guha J and Fang Genbao. 1999. Characteristics of ore-forming fluid in gold deposit in Linglong, Shandong Province[J]. *Geochemistry*, 28(50): 421 ~ 436 (in Chinese with English abstract).
- Naden J and Shepherd T J. 1989. Role of methane and carbon dioxide in gold deposition[J]. *Nature*, 342: 793 ~ 795.
- Ni Yongjin, Shan Yehua, Wushichong, *et al.* 2015. Determination of slip sense of the Laoshanáo fault in the Xiangdong tungsten deposit (South-east Hunan) and its implications for mineral exploration[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(3): 436 ~ 445 (in Chinese with English abstract).
- Roedder E and Bodnar R J. 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies[J]. *Ann Rev Earth Plannet Sci.*, 8: 263 ~ 301.
- Shepherd T J and Rakin A. 1985. ALDERTON DHM. A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies[M]. Blackie and Son Limited, 1 ~ 154.
- Song Chao, Wei Wei, Hou Qinglin, *et al.* 2016. Geological characteristics of the Laoshanáo shear zone and its relationship with the Xiangdong tungsten deposit, Chaling, eastern Hunan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5): 1 571 ~ 1 580 (in Chinese with English abstract).
- Song Xinhua and Zhou Xunruo. 1990. Tectonic setting, magmatic source and evolution of Dengfuxian granite[J]. *Geoscience*, 6(4): 459 ~ 469 (in Chinese with English abstract).
- Song Xinhua, Zhou Xunruo and Wu Guozhong. 1988. Study of Dengfuxian granite by melting experiment[J]. *Chinese Journal of Geology*, 23(3): 247 ~ 258 (in Chinese with English abstract).
- Sun Zhenjia. 1990. Metallogenic-tectonic characteristics of Dengfuxian tungsten deposit and deep metallogenic forecast[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 14(2): 139 ~ 150 (in Chinese with English abstract).
- Van Den Kerkhof A M and Hein U F. 2001. Fluid inclusion petrography[J]. *Lithos*, 55(1 ~ 4): 27 ~ 47.
- Wang Xudong, Ni Pei, Yuan Shunda, *et al.* 2012. Fluid inclusion studies of the Huangsha quartz-vein type tungsten deposit, Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 122 ~ 132 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yingqun, Lu Yuntai, Chen Zhenghui, *et al.* 2015. Fluid inclusion characteristic and ore-bearing granite U-Pb age of the Dengfuxian tungsten deposit, Hunan Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 31(1): 77 ~ 88 (in Chinese with English abstract).
- Wilkinson J J. 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits[J]. *Lithos*, 55(1 ~ 4): 229 ~ 272.
- Xiong Yiqu. 2017. Spatiotemporal structure and ore-forming process of hydrothermal metallogenic system in Dengfuxian orefield, eastern Hunan[D]. Changsha: Central South University of School of Geosciences and Info-Physics, 94 ~ 103 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Yiqu, Shao Yongjun, Liu Jianping, *et al.* 2016. Ore-forming fluid of quartz-vein type tungsten deposits, Xitian orefield, eastern Hunan, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 26(5): 1 107 ~ 1 119 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Y Q, Shao Y J, Zhou H D, *et al.* 2017. Ore-forming mechanism of quartz-vein-type W-Sn deposits of the Xitian district in SE China: Implications from the trace element analysis of wolframite and investigation of fluid inclusions[J]. *Ore Geology Reviews*, 83: 152 ~ 173.
- Yang Yi. 2014. The research on granitic magma evolution and metallogeny of the Dengfuxian tungsten deposit[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology. Faculty of Land Resource Engineering, 17 ~ 75 (in Chinese with English abstract).
- Ye Shiwen. 2014. The characteristics of fluid inclusion in Dengfuxian tungsten deposit Hunan[D]. Jingzhou: Yangtze university of Earth environment and Water resources, 21 ~ 39 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianqi, Zhu Shangqing and Zhai Yuxing. 1985. *Mineral Deposits* [M]. Geological Publishing House, 1 ~ 322.

- Zhang Xiong, Wu Shichong, Chen Mei, *et al.* 2015. Ore potential of Taihexian gold polymetallic deposit in Xitian area, eastern Hunan Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 31(2): 188 ~ 193(in Chinese with English abstract).
- Zheng Minghong, Shao Yongjun, Wei Hantao, *et al.* 2015. Petrogenesis of Batuan intrusion: Constraints from petro-geochemistry, zircon U-Pb dating and Hf isotope[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 25(11): 3 171 ~ 3 181(in Chinese with English abstract).
- Zheng Minghong, Shao Yongjun, Liu Zhongfa, *et al.* 2016. Rr-Sr isotope and main trace element composition characteristics of sulfide and deposit genesis investigation of Dalong Pb-Zn deposit[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 47(11): 3 792 ~ 3 799(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 柏道远, 王先辉, 马铁球, 等. 2006. 湘东南印支期褶皱特征及形成机制[J]. *华南地质与矿产*, 11(4): 50 ~ 57.
- 蔡 维, 朱浩峰, 郭 锦, 等. 2014. 湖南邓阜仙地区成矿条件及找矿方向[J]. *四川地质学报*, 34(4): 538 ~ 542.
- 蔡 杨, 黄 卉, 谢 旭. 2010. 湖南邓阜仙钨矿地质及岩体地球化学特征[J]. *矿床地质*, 29(增刊): 1 067 ~ 1 068.
- 蔡 杨, 陆建军, 马东升, 等. 2013. 湖南邓阜仙印支晚期二云母花岗岩年代学、地球化学特征及其意义[J]. *岩石学报*, 29(12): 4 215 ~ 4 231.
- 蔡 杨, 马东升, 陆建军, 等. 2012. 湖南邓阜仙钨矿辉钼矿铼-钨同位素定年及硫同位素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 28(12): 3 798 ~ 3 808.
- 陈子龙, 孙振家, 杨楚雄. 1991. 邓阜仙钨矿床地质地球化学特征及成因研究[J]. *中南矿冶学院学报*, 22(2): 117 ~ 122.
- 邓 军, 王长明, 李龚健. 2012. 三江特提斯叠加成矿作用样式及过程[J]. *岩石学报*, 28(5): 1 349 ~ 1 361.
- 范宏瑞, 金成伟, 沈远超. 1998. 新疆哈图金矿成矿流体地球科学[J]. *矿床地质*, 17(2): 135 ~ 149.
- 范宏瑞, 谢弈汉, 翟明国, 等. 2003. 豫陕小秦岭脉状金矿床三期流体运移成矿作用[J]. *岩石学报*, 19(2): 260 ~ 265.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 2005. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. *高校地质学报*, 11(3): 291 ~ 304.
- 黄鸿新, 陈郑辉, 路远发, 等. 2014. 湘东钨矿成矿岩体锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 37(1): 26 ~ 36.
- 黄 卉, 马东升, 陆建军, 等. 2011. 湖南邓阜仙复式花岗岩体的锆石 U-Pb 年代学研究[J]. *矿物学报*, 31(增刊): 590 ~ 591.
- 黄 卉, 马东升, 陆建军, 等. 2013. 湘东邓阜仙二云母花岗岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学研究[J]. *矿物学报*, 33(2): 245 ~ 255.
- 刘焕枢, 张学渊. 1997. 湘东钨矿深部矿脉的发现及对矿地质找矿的启示[J]. *中国钨业*, 12(1): 11 ~ 14.
- 刘 丽, 顾雪祥, 彭义伟, 等. 2012. 贵州太平洞金矿床流体包裹体特征及流体不混溶机制[J]. *岩石学报*, 28(5): 1 568 ~ 1 576.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪 培, 等. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 1 ~ 450.
- 卢焕章, Guha J, 方根保. 1999. 山东玲珑金矿的成矿流体特征[J]. *地球化学*, 28(50): 421 ~ 436.
- 倪永进, 单业华, 伍式崇, 等. 2015. 湖南东南部湘东钨矿区老山坳断层性质的厘定及其对找矿的启示[J]. *大地构造与成矿学*, 39(3): 436 ~ 445.
- 宋 超, 卫 巍, 侯泉林, 等. 2016. 湘东茶陵地区老山坳剪切带特征及其与湘东钨矿的关系[J]. *岩石学报*, 32(5): 1 571 ~ 1 580.
- 宋新华, 周珣若. 1992. 邓阜仙花岗岩的构造环境、岩浆来源与演化[J]. *现代地质*, 6(4): 459 ~ 469.
- 宋新华, 周珣若, 吴国忠. 1988. 邓阜仙花岗岩熔融试验研究[J]. *地质科学*, 23(3): 247 ~ 258.
- 孙振家. 1990. 邓阜仙钨矿成矿构造特征及深部成矿预测[J]. *大地构造与成矿学*, 14(2): 139 ~ 150.
- 王旭东, 倪 培, 袁顺达, 等. 2012. 江西黄沙石英脉型钨矿床流体包裹体研究[J]. *岩石学报*, 28(1): 122 ~ 132.
- 汪英群, 路远发, 陈郑辉, 等. 2015. 湖南邓阜仙钨矿流体包裹体特征及含矿岩体 U-Pb 年龄[J]. *华南地质与矿产*, 31(1): 77 ~ 88.
- 熊伊曲. 2017. 湘东邓阜仙矿田热液成矿系统的时空结构与成矿过程[D]. 长沙: 中南大学地球科学与信息物理学院, 94 ~ 103.
- 熊伊曲, 邵拥军, 刘建平, 等. 2016. 锡田矿田石英脉型钨矿成矿流体[J]. *中国有色金属学报*, 26(5): 1 107 ~ 1 119.
- 杨 毅. 2014. 湖南邓阜仙钨矿花岗岩岩浆演化与成矿作用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学国土资源工程学院, 67 ~ 72.
- 叶诗文. 2014. 湖南邓阜仙钨矿流体包裹体研究[D]. 荆州: 长江大学地球环境与水资源学院, 21 ~ 39.
- 袁见齐, 朱上庆, 翟裕行. 1985. 矿床学[M]. 地质出版社, 1 ~ 322.
- 张 雄, 伍式崇, 陈 梅, 等. 2015. 湘东锡田地区太和仙金多金属矿找矿潜力分析[J]. *华南地质与矿产*, 31(2): 188 ~ 193.
- 郑明泓, 邵拥军, 隗含涛, 等. 2015. 湘东八团岩体的成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年代学以及 Hf 同位素的制约[J]. *中国有色金属学报*, 25(11): 3 171 ~ 3 181.
- 郑明泓, 邵拥军, 刘忠法, 等. 2016. 大垅铅锌矿床硫化物 Rb-Sr 同位素和主微量成分特征及矿床成因[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 47(11): 3 792 ~ 3 799.