

青海三色沟铅锌矿流体包裹体特征及矿床成因

宋泽友^{1,2}, 赖健清^{1,2}, 王雄军^{1,2}, 张建东^{1,2}, 宋文彬^{1,2}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: 三色沟矿区位于我国著名成矿带之一的东昆仑造山带中部, 矿区出现的主要矿化类型包括脉型铅锌矿化和斑岩型铜矿化。流体包裹体研究表明, 三色沟矿区流体包裹体类型包括气液两相水溶液包裹体(I型)、水溶液-CO₂包裹体(II型)和纯CO₂包裹体(III型)。成矿流体具有低盐度、低密度的特点, 铅锌成矿温度下限值为178~209℃, 盐度为0.3%~18.8%(NaCl_{eq}), 估算成矿压力为50~143 MPa; 铜矿化成矿温度下限值为182~228℃, 盐度为3.5%~18.8%(NaCl_{eq}), 估算成矿压力为71~164 MPa。成矿过程中流体发生相分离, 对多金属硫化物的沉淀起到重要作用。结合矿区的地质演化史, 认为矿区中部与岩浆热液作用有关的斑岩型铜矿化, 与区内强烈发育的铅锌矿化均为同一构造-岩浆作用的产物。

关键词: 流体包裹体; 成矿流体; 东昆仑; 三色沟; 矿床成因

中图分类号: P618.42 文献标志码: A

Characteristics of fluid inclusions and ore genesis of Sansegou Pb-Zn deposit in Qinghai Province, China

SONG Ze-you^{1,2}, LAI Jian-qing^{1,2}, WANG Xiong-jun^{1,2}, ZHANG Jian-dong^{1,2}, SONG Wen-bin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenetic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,
Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The Sansegou Pb-Zn deposit is located in the eastern Kunlun orogenic belt, one of the famous metallogenic belt in China. The main mineralized types in the deposit are vein-type Pb-Zn mineralization and porphyry-style copper mineralization. Fluid inclusion studies indicate that the fluid inclusions are in three types: two-phase aqueous inclusion (type I), three-phase CO₂-aqueous fluid inclusion (type II) and pure CO₂ fluid inclusion (type III). The ore-forming hydrothermal fluids are characterized by low salinity, low density, and the Pb-Zn mineralizing temperatures range from 178 to 209℃, low salinities range from 0.3% to 18.8% NaCl equivalent, and the calculated pressure ranges from 50 to 143 MPa; the porphyry copper mineralizing temperatures range from 182 to 228℃, salinities range from 3.5% to 18.8% NaCl equivalent, and the calculated pressure ranges from 71 to 164 MPa. The immiscibility of ore-forming fluids plays an important role in the metallogenetic process of Pb-Zn-Cu deposit. Associated with the tectonic environment, it is suggested that the porphyry-style copper mineralization in the central part of the ore district which is related to magmatic hydrothermal activities is the result of the same tectonic-magmatic activities as Pb-Zn mineralization.

Key words: fluid inclusions; ore-forming fluid; eastern Kunlun; Sansegou; deposit genesis

青海都兰县三色沟矿区位于东昆中金铁(钨锡)多金属成矿带中。该成矿带上已发现矽卡岩、斑岩型、

热液型铁铜钼铅锌钴金多金属等多种成因类型矿床^[1-3]。从构造背景和成矿条件上看, 该区具有形成与

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划重大项目(2006BAA01B06)

收稿日期: 2011-12-01; 修订日期: 2012-01-04

通信作者: 赖健清, 教授, 博士; 电话: 13875983805; E-mail: ljq@csu.edu.cn

中酸性岩浆活动有关的斑岩型铜矿、岩浆气液型铅锌矿和金矿的潜力。

三色沟铅锌矿发现时间较短，基础地质工作程度低，研究工作更加薄弱，从而制约了对矿床成因和找矿预测的深入认识。本文作者拟通过对矿物流体包裹体的研究，揭示成矿流体系统特征，对比两期成矿作用，探讨矿床的成因类型及其成矿机制。

1 矿区成矿地质背景

三色沟矿区位于昆中大断裂以北的昆中岩浆弧带，大地构造位置上属华北—塔里木板块西南缘过渡带(见图1)。

矿区出露地层为(新太古界—)古元古界金水口群

白沙河组，岩性以片岩和片麻岩为主，并分为多个地层单位。主要包括金水口群白沙河组第三段(Ar_3Pt_1^3)混合花岗岩、片麻岩类；第四段(Ar_3Pt_1^4)片岩类、长英质粒岩类和大理岩类，矿区北部还发现范围尚广的变质流纹岩。矿区构造以断裂为主，构造线方向为北西向和北东向，动力变质作用较发育。断裂构造可分为三级，其中一条穿过矿区东北角的北西向区域性逆冲挤压构造带(F101)为矿区一级构造；矿区二级构造为北西向剪切构造，为区域北西向韧性剪切带的北延；矿区三级构造为北东—北北东向及北西向两组断裂构造，为矿区铅锌矿体的主要控矿构造。

岩浆岩包括地层中的火山岩和侵入岩体。古老的变质地层中的火山岩主要包括两类：1)零星出现的斜长角闪岩、角闪片岩、黑云母片岩等；2)变质流纹岩，遭受绿片岩相区域变质作用。侵入岩体具有多期多阶

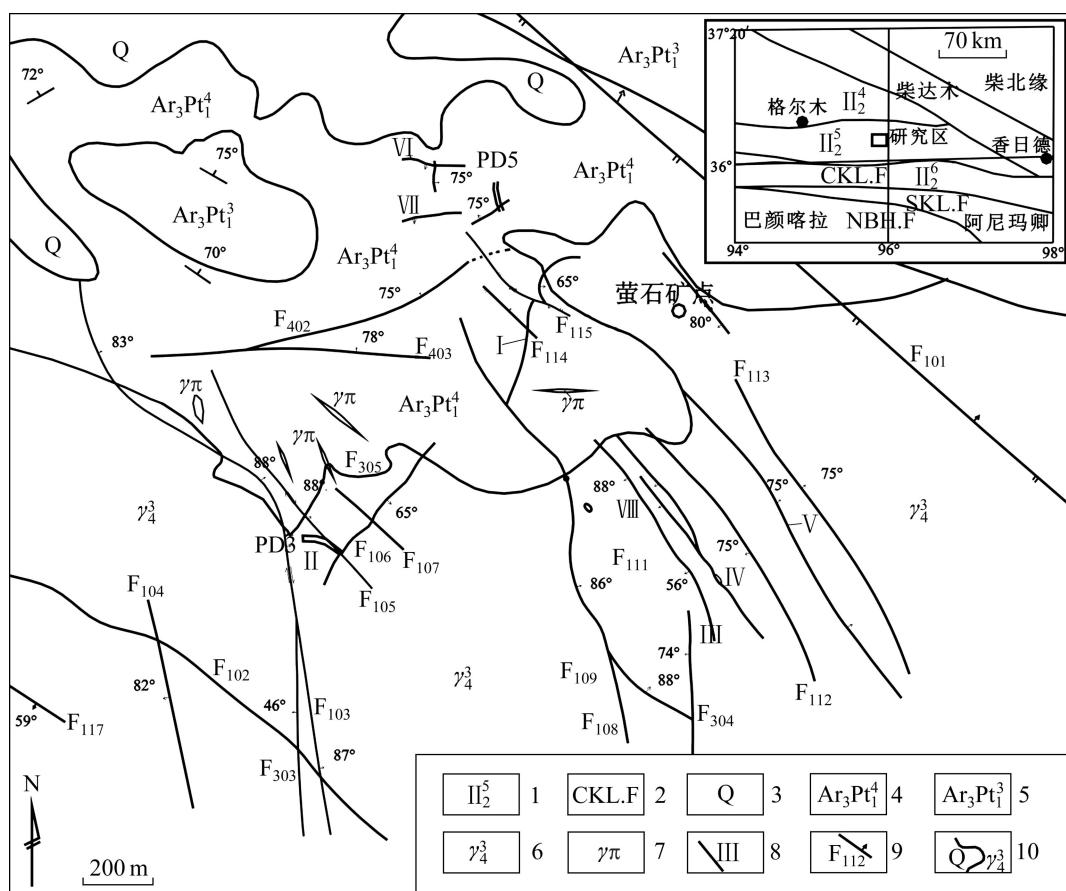


图1 三色沟矿区地质图(根据文献[3]修改): 1—构造带代号; II₂⁴—昆北构造带; II₂⁵—昆中构造带; II₂⁶—昆南构造带; 2—区域性大断裂; CKLF—昆中断裂; SKLF—昆南断裂; NBHF—北巴颜喀拉断裂; 3—第四系; 4—(金水口群)白沙河组第四段; 5—白沙河组第三段; 6—海西期花岗岩; 7—岩脉; 8—矿体; 9—断裂; 10—地质界线

Fig. 1 Geological map of Sansegou lead-zinc deposit (Modified from Ref. [3]): 1—Structural belt; II₂⁴—North Kunlun; II₂⁵—Central Kunlun; II₂⁶—South Kunlun; 2—Regional fault; CKLF—Central Kunlun fault; SKLF—South Kunlun fault; NBHF—North Bayan Har; 3—Quaternary; 4—The fourth member of baishahe F; 5—The third member of baishahe F; 6—Variscan granite; 7—Dike; 8—Orebody; 9—Fault; 10—Geological boundary

段性, 主要岩性包括中粗粒-细粒黑云母二长花岗岩和花岗斑岩。花岗斑岩以岩脉形式侵入于黑云母二长花岗岩体中, 脉宽度仅数厘米至数十厘米。

2 矿化特征

矿区出现的主要矿化类型包括脉型铅锌矿化、细脉浸染状铜矿化。其中以铅锌矿化为主, 铜矿化见于两处。另外在萤石沟发育成萤石矿脉。

脉型铅锌矿已发现7个脉(组), 见于Ⅷ号矿体地表露头及PD3坑道内洞室分布于矿区南、东、北部, 各呈不同的产状。矿体的围岩以华力西期黑云母二长花岗岩和 Ar_3Pt_1^4 地层变质流纹岩为主, 是一套坚硬脆性的岩石。

矿(化)体受断裂破碎蚀变带控制, 矿化具有不均匀、不连续、厚度不稳定、分段富集的特征; 从地表和平硐来看, 深部矿化比地表好。细脉浸染状铜矿化见于两处, 其一为矿区东南部Ⅷ号矿体地表露头, 由多条含铜斑岩脉体组成, 单脉宽6~55 cm, 脉体走向北东—近南北向; 其二见于矿区南部PD3坑道内洞室中, 厚度变化较大, 脉宽10~50 cm, 走向近南北向。

矿区围岩蚀变种类多, 包括硅化、绢云母化、铁白云石化、钾长石化、绿泥石化、绿帘石化、泥化、黄铁矿化、萤石化和电气石化等。以硅化和绢云母化最为强烈, 分带性不明。与铅锌成矿作用关系密切的围岩蚀变主要为硅化、绢云母化和铁白云石化, 伴生有绿泥石化和泥化作用。硅化和绢云母化的范围较广, 铁白云石化分布范围较小, 但与铅锌矿密切相关。与铜矿化有关的围岩蚀变主要为硅化、绢云母化和黄铁矿化, 组合成黄铁绢英岩化。

矿石主要为石英-金属硫化物型, 其中金属矿物方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和少量黄铜矿。脉石矿物以石英为主, 其次为长石、绢云母、绿泥石和铁白云石。矿石结构包括交代结构、粒状结构、碎裂结构和残余结构。矿石构造主要为角砾状(见图2(a))、块状(见图2(b))、脉状(见图2(b)和(c))、浸染状(图2(d))和团包状等。

根据矿石中的矿脉穿插关系、矿物组合、结构构造及围岩蚀变特征, 认为该矿区存在两期矿化和, 即脉状铅锌矿化(D1)及细脉浸染状铜矿化(D2), 其中, 铅锌成矿作用至少经历了黄铁矿-铁白云石阶段、石英-方铅矿(闪锌矿)多金属硫化物及石英(萤石)阶段, 其中石英-方铅矿(闪锌矿)多金属硫化物阶段为主成矿阶段。

3 流体包裹体

3.1 样品采集及测试方法

本次研究样品选择三色沟矿区不同位置、不同矿化类型的13件样品进行包裹体研究(见表1)。室内将样品磨制成双面抛光的厚片, 厚度为0.06~0.08 mm。研究工作在中南大学流体包裹体实验室完成。高倍显微镜下发现石英和萤石中含有各类流体包裹体。研究采用Linkam公司生产的THMS-600型地质用冷热台, 温度范围在-196~600 °C之间, 经标准人工包裹体校准, 温度范围为30~600 °C时精度为1 °C, -196~30 °C时精度为0.1 °C。显微热台测定包裹体的均一温度, 并通过水溶液包裹体的冰点温度(水溶液包裹体)或二氧化碳笼合物的熔化温度(含二氧化碳包裹体)的测定, 根据BROWN^[4]的FLINCOR计算机程序, 采用

表1 三色沟矿区测温样品特征

Table 1 Characteristics of measuring temperature sample in Sansegou deposit

样品号	采样位置	岩性特征	矿化期
SI-6b	矿区北部I号 铅锌矿体	含方铅矿褐化 的石英脉	D1
SXJ-6	矿区北部I号 铅锌矿体	黄铁矿化 石英脉	D1
SXJ-5a	矿区北部I号 铅锌矿体	含团块状方 铅矿石英脉	D1
SPD1-3b	矿区西部II号 铅锌矿体	含浸染状方 铅矿石英脉	D1
SPD2-15a	矿区西部II号 铅锌矿体	绿泥石化 含细脉方铅矿	D1
SPD2-5b	矿区西部II号 铅锌矿体	含方铅矿、 闪锌矿石英脉	D1
SIII-12b	矿区东部III号 含矿带	含方铅矿石英 脉石英脉	D1
SPD5-5	矿区东部III号 含矿带	含块状方铅 矿石英脉	D1
SP1-12b	矿区中部花岗岩	石英脉	D1
SP1-16a	矿区中部花岗岩	绢云母化 钾长花岗岩	D1
SKB	矿区东北萤石沟	花岗岩中 的萤石脉	D1
SP1-4C	矿区中部 花岗斑岩脉	强绢云母化 斑岩	D2
SP1-6b	矿区中部 花岗斑岩脉	孔雀石化 花岗斑岩	D2

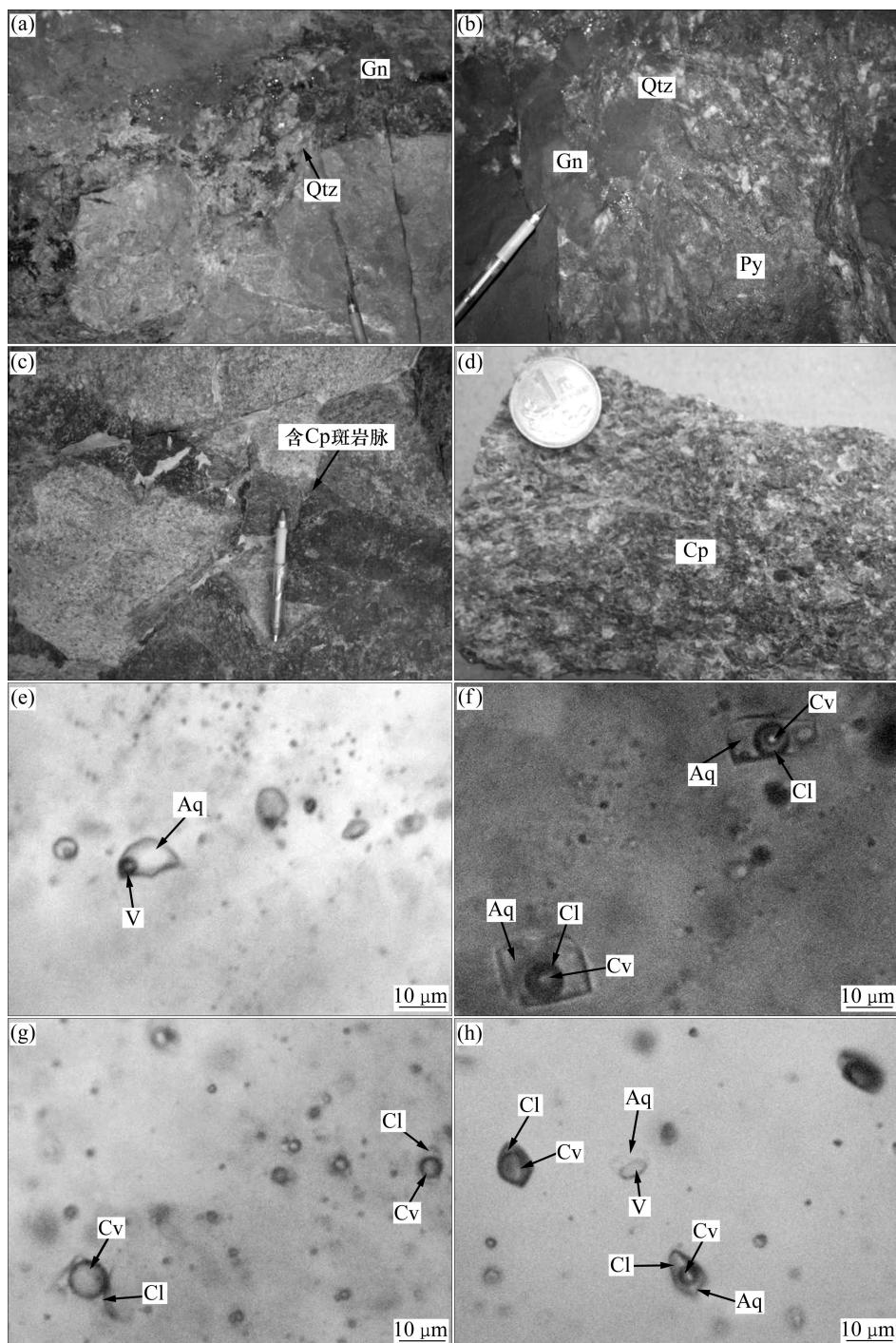


图2 三色沟矿区矿体及流体包裹体特征: (a) 角砾状矿石, 方铅矿胶结物胶结早阶段角砾; (b) 块状-网脉状黄铁矿被后期石英方铅矿(闪锌矿)脉穿插; (c) 地表VIII号含铜斑岩脉; (d) PD3 斑岩中的细脉浸染状黄铜矿化; (e) SP1-6b 石英中的 I型包裹体, 气泡较小; (f) SXJ-5a 石英中簇状II型包裹体在常温下可见水溶液和两相 CO_2 ; (g) SKb 萤石中簇状II型包裹体; (h) SPD5-5 石英中簇状富 CO_2 的II型、III型包裹体与I型包裹体共生, 碳质不均一; Gn—方铅矿; Py—黄铁矿; Cp—黄铜矿; Qtz—石英; Aq—水溶液; Cl—液相二氧化碳; Cv—气相二氧化碳; V—气相

Fig. 2 Ore characteristics and microphotographs of fluid inclusions in Sansegou deposit: (a) Brecciate ore, galena cemented early stages breccias; (b) Mass-net vein pyrite penetrated by later quartz-galena-sphalerite veins; (c) VIII-chalcopyrite in granitic porphyry; (d) Vein lets disseminated chalcopyrite in PD3 of granitic porphyry; (e) Vapor-liquid two-phase inclusions in quartz of SP1-6b; (f) Three-phase CO_2 -aqueous fluid inclusion in quartz of SXJ-5a; (g) CO_2 -aqueous fluid inclusion in fluorite of SKb; (h) Coexistence of CO_2 -aqueous inclusions with vapor-liquid fluid inclusion in quartz of SPD5-5; Gn—Galena; Py—Pyrite; Cp—Chalcopyrite; Qtz—Quartz; Aq—Aqueous; Cl—Liquid CO_2 ; Cv—Vapor CO_2 ; V—Vapor

BROWN 和 LAMB 的等式^[5]计算了水溶液的盐度, 并估算了矿物形成的压力。

3.2 流体包裹体岩相学特征及分类

包裹体岩相学研究表明矿区含铅锌石英脉和含铜斑岩的石英及萤石等矿物中原生流体包裹体发育。依其室温下的相态特征, 将这些原生流体包裹体分为如下3种主要类型。

气液两相水溶液包裹体(I型)。室温下由少量盐水溶液及气泡构成(见图2(e)), 其中气相占整个包裹体总体积的比例多在10%~50%, 平均值为23%, 该类包裹体个体较大, 一般在4~16 μm, 平均为8 μm, 形态一般为椭圆形、次圆状或不规则状。随机分布于石英颗粒中, 部分呈列状分布。

水溶液-CO₂包裹体(II型)。此类包裹体在含铅锌石英脉的石英、萤石及含铜斑岩的石英中均已发现。常温下一般呈三相状态(见图2(f)), CO₂相占包裹体总体积分数多在15%~90%之间, 平均值为60%, 气相CO₂占CO₂相比例一般为0~80%, 平均值为20%; 该类包裹体发育相对较好, 占整个包裹体总数的60%, 其大小一般为4~14 μm, 平均为7 μm; 又可分为2种亚类型, II₁型以水溶液占优势, 碳质相比约为15%~60%, 在常温下CO₂相分为气液两相; II₂型CO₂相占优势, 常温下可见两相CO₂和比例很小的水溶液相, 碳质相比例为60%~90%; 该类包裹体具有不均一捕获的特征(见图2(f)和(h)), 2种亚类型共生组成FIA。

纯CO₂包裹体(III型)。在常温下常见CO₂呈两相(见图2(g)及(h)), 其中气相CO₂占CO₂相比例一般为10%~60%; 少量包裹体在常温下呈一相, 但在降温过程中多变成两相状态, 该类包裹体大小一般为5~18 μm, 形态一般呈椭圆形和次圆状; 在主矿物中一般多成群或随机分布, 显示原生包裹体特征。

以上不同类型的包裹体常密集成群分布, 且常分布于同一石英或萤石晶体中, 显示出不同类型包裹体捕获时间可能较相近的特点。

3.3 流体包裹体显微测温结果

各类型流体包裹体测温结果如表2和3所列, 参数如表4所列, 利用均一温度和盐度绘制了直方图, 如图3所示。

3.3.1 铅锌矿化期流体包裹体测温特征

气液两相水溶液包裹体。将包裹体冷却至-41~-68 °C时液相冻结, 升温时观测到石英-方铅矿阶段部分包裹体初熔温度为-29.8~-10.8 °C; 冰点温度为

-8.0~-0.2 °C, 计算流体盐度为0.3%~11.7% (等量NaCl, 质量分数), 平均值为6.8%; 均一温度为178~314 °C, 多数集中于195~286 °C, 均一至液相, 据包裹体均一温度及盐度值估算流体密度为0.73~0.95 g/cm³; 石英(萤石)阶段部分包裹体初熔温度为-23.2~-18.9 °C; 冰点温度为-4.1~-1.0 °C, 计算的盐度为1.6%~6.5%, 平均值为4.0%; 均一温度为185~351 °C, 均一至液相; 据包裹体均一温度及盐度值估算流体密度为0.59~0.93 g/cm³。

水溶液-CO₂包裹体。将包裹体冷却至-107~-92 °C完全冻结, 升温时石英-方铅矿阶段包裹体固相CO₂熔化温度为-59.9~-53.2 °C; CO₂笼合物消失温度为-1.0~10.6 °C, 计算的盐度为0.4%~16.6%, 平均值为9.9%; 部分均一温度为14.5~30.9 °C, 均一至液相; 完全均一温度为243~390 °C, 以均一至液相为主, 其中, 5个包裹体临界均一, 均一温度为310~323 °C, 2个均一至CO₂相, 均一温度为338和345 °C; 计算得出流体密度为0.19~1.00 g/cm³。

石英(萤石)阶段包裹体固相CO₂熔化温度为-59.0~-56.9 °C; CO₂笼合物消失温度为4.5~9.5 °C, 计算的盐度值为1.0%~9.7%, 平均值为5.3%; 部分均一以液相为主, 温度为22.1~30.2 °C, 一个均一为气相, 温度为26.8 °C; 完全均一温度为263~355 °C, 以均一至液相为主, 另一个包裹体临界均一, 均一温度为340 °C; 计算得出流体密度为0.34~0.93 g/cm³。其中, 主矿物为萤石的包裹体CO₂笼合物消失温度为-3.6~2.9 °C, 计算流体的盐度为12.0%~18.8%, 平均值为14.9%; 部分均一温度为19.6~29.8 °C, 均一至液相; 完全均一温度为203 °C, 均一至液相; 计算得出流体密度为0.68~1.06 g/cm³。

纯CO₂包裹体。冷冻至-100~-98 °C完全冻结, 升温时石英-方铅矿阶段包裹体固相CO₂熔化温度为-59.2~-55.3 °C; 均一温度为19.2~30.1 °C, 均一至液相。石英(萤石)阶段固相CO₂熔化温度为-59.0~-57.5 °C, 均一温度为22.1~30.2 °C, 均一至液相。依据CO₂的均一方式及温度估算CO₂相密度为0.59~0.75 g/cm³。

3.3.2 斑岩铜矿化期流体包裹体测温特征

气液两相水溶液包裹体。将包裹体冷却至-47~-42 °C时完全冻结, 升温时冰点温度为-7.0~-4.4 °C, 计算流体盐度为7.0%~10.5%, 平均值为8.2%, 包裹体向液相均一, 均一温度为182~228 °C, 根据包裹体均一温度及盐度值估算的流体密度为0.86~0.93 g/cm³。

水溶液-CO₂包裹体。将包裹体冷却至-104~-95

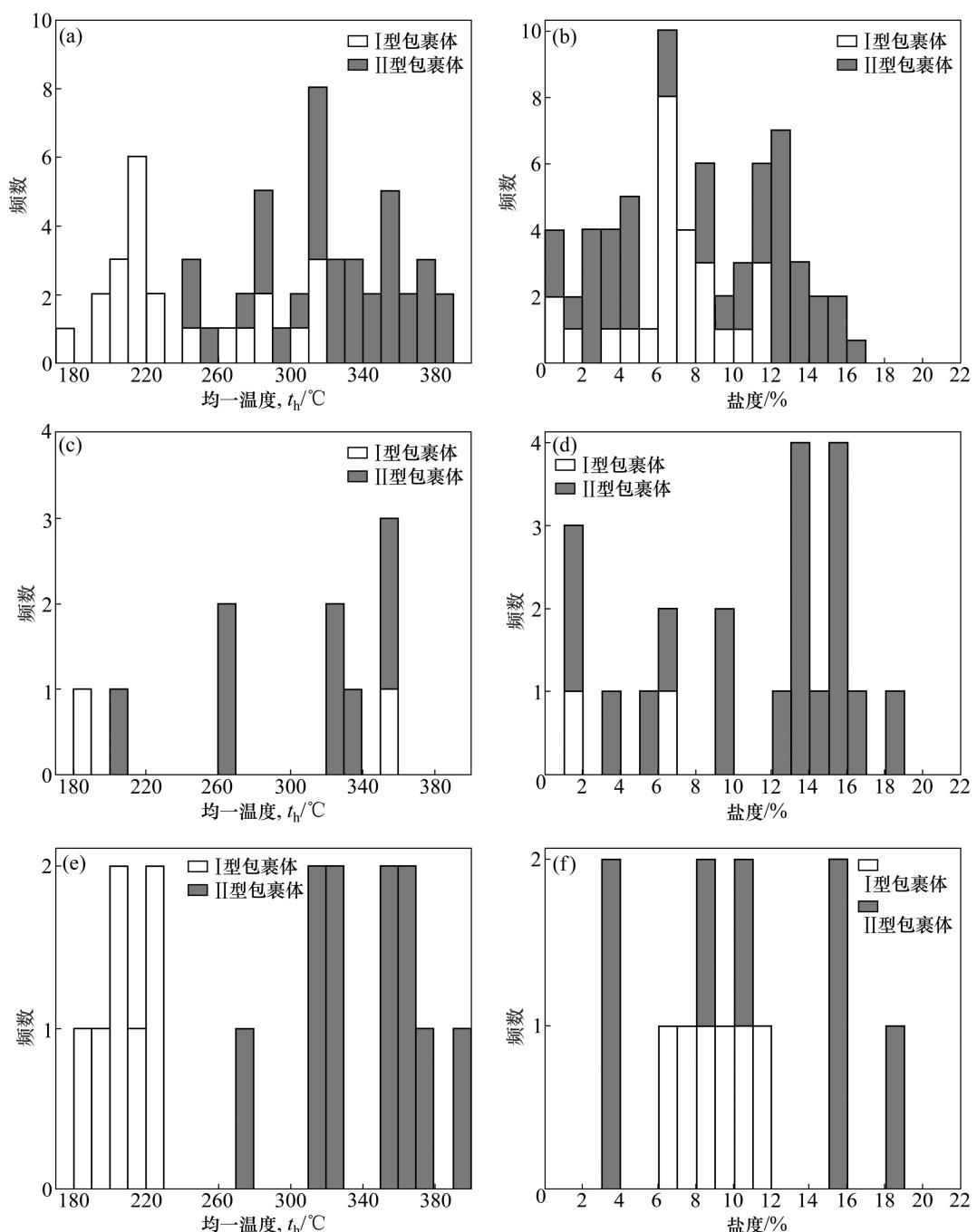


图3 流体包裹体均一温度及盐度直方图: (a) D₁期铅锌矿化阶段流体包裹体均一温度; (b) D₁期铅锌矿化阶段流体包裹体盐度; (c) D₁期石英-萤石化阶段流体包裹体均一温度; (d) D₁期石英-萤石化阶段流体包裹体盐度; (e) D₂期斑岩铜矿化流体包裹体均一温度; (f) D₂期斑岩铜矿流体包裹体盐度

Fig. 3 Histograms of homogenization temperature and salinity of fluid inclusion: (a) Homogenization temperature of fluid inclusion in Pb-Zn mineralization stage, D₁ epoch; (b) Salinity of fluid inclusion in Pb-Zn mineralization stage, D₁ epoch; (c) Homogenization temperature of fluid inclusion in quartz-fluoritization stage, D₁ epoch; (d) Salinity of fluid inclusion in quartz-fluoritization stage, D₁ epoch; (e) Homogenization temperature of fluid inclusion in porphyry-style Cu mineralization epoch; (f) Salinity of fluid inclusion in porphyry-style Cu mineralization epoch

$\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$ 流体两相不混溶区内,也表明包裹体捕获于不混溶 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 热液体系。

在均一温度与盐度关系图(见图5)上,铅锌矿化和铜矿化的样品点均有一个明显密集区,不同成矿阶段

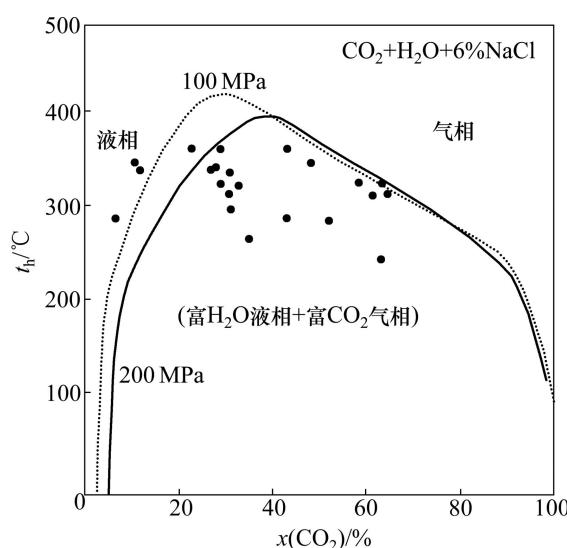


图4 含CO₂三相包裹体的 t_h - $x(\text{CO}_2)$ 曲线(根据文献[11]修改, $x(\text{CO}_2)$ 采用 Flincor 软件^[4]计算)

Fig. 4 Curves of total t_h - $x(\text{CO}_2)$ of CO₂-H₂O inclusions in Sansegou deposit (Plots modified from Ref. [11], $x(\text{CO}_2)$ calculated by Flincor software^[4])

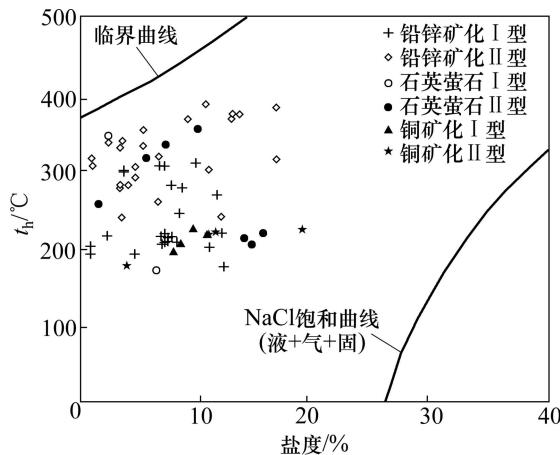


图5 包裹体均一温度与盐度曲线

Fig. 5 Diagrams of homogenization temperature—salinity of fluid inclusions

的密集区对应的均一温度和盐度均与各阶段的均一温度峰值及盐度峰值基本一致, 因此, 它们可以分别代表各阶段的成矿流体的一般特征。气液两相水溶液流体温度和盐度基本呈现正相关性, 而CO₂-水溶液流体盐度与温度之间关系较复杂, 这可能是原始均一的NaCl-H₂O-CO₂流体由于不混溶作用而分离出富CO₂相和富H₂O流体, 而盐类常趋向溶解于H₂O流体特别是液相H₂O中, 这样这部分流体的盐度值较高而且形成于流体演化早期, 对应较高的温度; 随着演化流体发生多次不混溶, CO₂-水溶液流体重复上述过程,

分离为含低盐度的富CO₂水溶液流体和较高盐度的水溶液流体, 大部分盐类将进入富水溶液相中, 而流体也自然降温, 所以, 在高温及低温度阶段, 可见到高盐度及低盐度的流体包裹体连续分布。

4.2 成矿温度

在流体不混溶过程中捕获的流体包裹体, 其捕获端元组分的流体包裹体均一温度相近且基本代表了成矿作用的温度^[12-13]。本区I型及III型包裹体为捕获于富NaCl-H₂O流体相及富CO₂相流体两种端元流体的代表, 故各包裹体组合中I型包裹体的最低均一温度相当于捕获温度。铅锌矿化期各样品的I型包裹体最低均一温度为178~209℃; 铜矿化期I型包裹体最低均一温度为182~228℃。考虑到铅锌铜等硫化物形成早于石英, 其形成温度应高于相应石英形成温度, 上述温度代表各期成矿温度的下限, 铅锌铜成矿温度为中温, 铜矿的成矿温度可能略高于铅锌矿。

4.3 成矿压力

采用等容线相交法^[14]对捕获压力进行估算, 其中水端元密度由前述各期成矿温度得出, CO₂密度由III型包裹体计算得出。因此, 矿区铅锌矿化不混溶流体中水端元组分的密度为0.86~0.89 g/cm³, 平均值为0.87 g/cm³, CO₂端元(III型)的密度0.59~0.78 g/cm³, 平均值为0.72 g/cm³; 铜矿化水端元组分的密度为0.83~0.89 g/cm³, 平均值为0.85 g/cm³, CO₂端元的密度为0.68~0.79 g/cm³, 平均值为0.76 g/cm³, 两端元包裹体的等容线相交获得包裹体的捕获压力如图6所示, 其中A为铅锌矿化期捕获压力范围, 压力值为50~143 MPa, 而B为铜矿化期捕获压力范围, 压力值

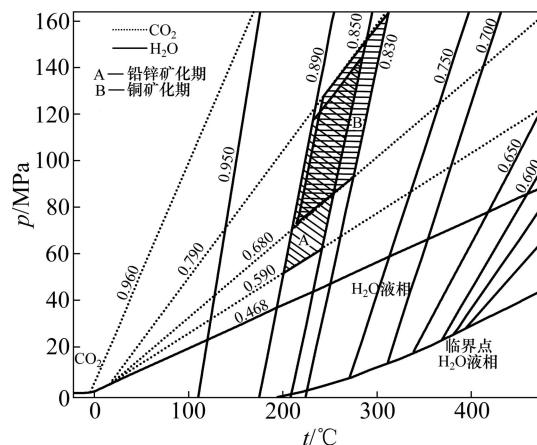


图6 H₂O和CO₂体系联合 p - t 曲线(根据文献[14]修改)

Fig. 6 p - t diagrams of H₂O-CO₂ system (Modified by Ref. [14], data on lines are mean densities in g/cm³)

为 71~164 MPa; 对比看出, 从铅锌矿化期到铜矿化期压力值呈微弱上升趋势。考虑到本区处于东昆仑造山带内部构造总体显示挤压特征, 因此捕获压力较高。同时注意到各期均出现低压力端元, 而这种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^[15~16]的典型标志。这与秦岭地区冷水沟铅锌银矿床压力特征相似^[17]。

4.4 矿床成因探讨

本区成矿流体具有低密度、低盐度和富 CO₂ 的特点, 且矿区发育硅化、绢云母化和铁白云石化, 说明含矿热液富硅、富碱及富 CO₂。CO₂ 作为一种弱酸对成矿流体 pH 值的缓冲调节起到了很大的作用, CO₂ 在流体中的存在有利于促进流体的相分离^[18~21]。流体中 CO₂ 的可能来源是幔源、下地壳中高级变质流体和岩浆热液^[7]。昆中地区早古生代和晚古生代—早中生代强烈的俯冲、碰撞造山过程不仅产生丰富的构造现象和变质作用, 而且带来了极丰富的地质流体, 成为本区金属元素的重要载体^[8]。本区含铅锌的断裂带及含铜的斑岩脉都明显晚于该地区华力西期的花岗岩, 所以推断成矿流体来自华力西期以后的构造-岩浆活动, 应为较深部演化程度较高的岩浆流体。

矿区包裹体的类型及成分等参数与邻近的五龙沟矿区相近, 特别是与其金矿化阶段较符合, 气相成分以 H₂O 和 CO₂ 为主, 含少量 CH₄。从空间上看, 五龙沟金矿与三色沟矿区相距仅 4 km, 两个矿床均产于区域北西向剪切带且严格受其旁侧次级北西—北北西向脆性断裂控制^[22]。相关研究表明: 五龙沟金矿床存在两期矿化, 早期年龄为 439~418 Ma, 晚期年龄为 236.5 Ma^[22], 金矿成矿主要发生于印支晚期, 与闪长玢岩(209 Ma)及钾长花岗岩的时代接近^[23]。

矿区华力西—印支早期的岩浆活动主要表现为二长花岗岩、黑云母花岗岩及一些岩脉的侵入。印支晚期该区造山过程进入晚期, 区内主要形成一系列切穿变质地层及华力西期花岗岩的北东—北西断裂, 并且沿它们的交汇部位浅成斑岩脉侵入。同时, 富含 CO₂ 的热水溶液沿北西—北北西向脆性断裂-裂隙控矿系统上升至地壳浅部, 由于压力降低、温度下降, 原来均一的超临界 NaCl-H₂O-CO₂ 流体发生不混溶引起 CO₂ 与 H₂O+NaCl 相分离, 导致成矿溶液成分和温压条件的急剧变化, 引起铅锌铜硫化物在有利的容矿构造沉淀成矿。三色沟铅锌矿的成矿流体特征与东昆仑地区其它矿床的成矿流体特征相似^[22~24], 具造山带型矿床的特征。

5 结论

1) 矿区位于昆中岩浆弧带, 主要矿化类型包括脉型铅锌矿化、细脉浸染状铜矿化, 其中, 石英-方铅矿(闪锌矿)多金属硫化物阶段为铅锌成矿期的主成矿阶段。

2) 铅锌矿化期与斑岩铜矿化期的包裹体类型没有明显的区别, 主要为气液两相包裹体、水溶液-CO₂ 包裹体和纯 CO₂ 包裹体, 其中, 水溶液-CO₂ 包裹体最为发育, 具原生包裹体特征。

3) 成矿流体具中温、低盐度、低密度、富 CO₂ 的特点。矿区铅锌矿体的形成温度为中温(下限值 178~209 °C), 其中包含萤石的形成阶段(203 °C), 估算成矿压力为 50~143 MPa, 斑岩型铜矿化成矿温度相对较高(182~228 °C), 估算成矿压力为 71~164 MPa, 二者的流体特征没有明显差异, 来自较深源演化程度的较高岩浆流体。

4) 与中酸性岩浆活动有关石英脉型铅锌矿成矿作用和与花岗斑岩有关的细脉浸染状铜(铅锌)矿成矿作用, 均为华力西期以后的构造-岩浆活动的产物。流体不混溶对多金属硫化物的沉淀起到了重要作用, 同时矿床形成于东昆仑造山过程中, 具造山带型矿床特征。

致谢:

野外工作期间得到青海西部资源有限责任公司、三色沟铅锌矿相关领导及湖南有色 247 队罗小平高工的支持和帮助, 室内研究期间得到了黄敏、安江华及其他同学的帮助, 在此谨向上述单位及个人表示诚挚的谢意!

REFERENCES

- [1] 潘 彤, 罗才让, 伊有昌, 钱 明. 青海省金属矿产成矿规律及成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1~227.
PAN Tong, LUO Cai-rang, YI You-chang, QIAN Ming. Metallogenetic laws and prospecting of metal deposit in Qinghai Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1~227.
- [2] 丁清风. 东昆仑造山带区域成矿作用与矿产资源评价[D]. 长春: 吉林大学, 2004: 1~84.
DING Qing-feng. Metallogenesis and mineral resources assessment in eastern Kunlun orogenic belt [D]. Changchun: Jilin University, 2004: 1~84.
- [3] 张德全, 王富春, 余宏全, 丰成友, 李大新, 李进文. 柴北缘

- 东昆仑地区造山型金矿床的三级控矿构造系统[J]. 中国地质, 2007, 34(1): 92–100.
- ZHANG De-quan, WANG Fu-chun, SHE Hong-quan, FENG Cheng-you, LI Da-Xing, LI Jin-wen. Three-order ore-controlling structural system of orogenic gold deposits in the northern Qaidam margin—east Kunlun region [J]. Geology in China, 2007, 34(1): 92–100.
- [4] BROWN P E. FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data [J]. American Mineralogist, 1989, 74(11/12): 1390–1393.
- [5] BROWN P E, LAMB W M. P-V-T properties of fluids in the system $H_2O \pm CO_2 \pm NaCl$: New graphical presentation and implications for fluid inclusion studies [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53(6): 1209–1221.
- [6] 杨震, 胡海峰, 张志. 青海格尔木三色沟铅锌矿矿床地质特征及成因探讨[C]//戴塔根. 2010年湖南矿物岩石地球化学论丛. 长沙: 中南大学出版社, 2010: 187–192.
- YANG Zhen, HU Hai-feng, ZHANG Zhi. Geology and genesis of Sansegou Pb-Zn deposit in Gelmu of Qinghai [C]// DAI Ta-gen. Contributions to Mineralogy Petrology and Geochemistry of Hunan. Changsha: Central South University Press, 2010: 187–192.
- [7] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 168–169, 313–315.
- LU Huan-zhang, FAN Hong-rui, NI Pei, OU Guang-xi, SHEN Kun, ZHANG Wen-huai. Fluid inclusions [M]. Beijing: Science Press, 2004: 168–169, 313–315.
- [8] 丰成友, 张德全, 王富春, 李大新, 余宏全. 青海东昆仑造山型金(锑)矿床成矿流体地球化学研究[J]. 岩石学报, 2004, 20(4): 949–960.
- FENG Cheng-you, ZHANG De-quan, WANG Fu-chun, LI Da-Xing, SHE Hong-quan. Geochemical characteristics of ore-forming fluids from the orogenic Au (and Sb) deposit in the eastern Kunlun area, Qinghai Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(4): 949–960.
- [9] DIAMOND L W. Review of the systematics of CO_2 - H_2O fluid inclusions [J]. Lithos, 2001, 55: 69–99.
- [10] WILKINSON J J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits [J]. Lithos, 2001, 55: 229–272.
- [11] BOWERS T S, HELGESON H C. Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of non-ideal mixing in the system H_2O - CO_2 - $NaCl$ on phase relations in ecologic systems: Metamorphic equilibria at high pressures and temperatures [J]. American Mineralogist, 1983, 68: 1059–1075.
- [12] 张文淮, 陈紫英. 流体包裹体地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 1–246.
- ZHANG Wen-huai, CHEN Zi-ying. Geology of fluid inclusions [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993: 1–246.
- [13] 刘斌, 沈昆. 流体包裹体热力学[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1–290.
- LIU Bin, SHEN Kun. Thermodynamics of fluid inclusion [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1–290.
- [14] ROEDDER E, BODNAR R J. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1980, 8: 263–301.
- [15] COX S F, KNACKSTEDT M A, BRAUN J. Principles of structural control on permeability and fluid flow in hydrothermal system [J]. Reviews in Economic Geology, 2001, 14: 1–24.
- [16] SIBSON R H, ROBERT F, POULSEN H. High angle reverse faults, fluid pressure cycling and mesothermal gold quartz deposits [J]. Geology, 1988, 16: 551–555.
- [17] 祁进平, 陈衍景, 倪培, 赖勇, 丁俊英, 宋要武, 唐国军. 河南冷水北沟铅锌银矿床流体包裹体研究及矿床成因[J]. 岩石学报, 2007, 23(9): 2119–2130.
- QI Jin-ping, CHEN Yan-jing, NI Pei, LAI Yong, DING Jun-ying, SONG Yao-wu, TANG Guo-jun. Fluid inclusion constraints on the origin of the Lengshuibigou Pb-Zn-Ag deposit, Henan Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(9): 2119–2130.
- [18] 卢焕章. CO_2 流体与金矿化: 流体包裹体的证据[J]. 地球化学, 2008, 37(4): 321–328.
- LU Huan-zhang. Role of CO_2 fluid in the formation of gold deposits: Fluid inclusion evidence [J]. Geochimica, 2008, 37(4): 321–328.
- [19] 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 秦朝建, 吴孔文, 任涛. 岩浆–热液体系成矿流体演化及其金属元素气相迁移研究进展[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 100–112.
- LENG Cheng-biao, ZHANG Xing-chun, WANG Shou-xu, QIN Chao-jian, WU Kong-wen, REN Tao. Advances of researches on the evolution of ore-forming fluids and the vapor transport of metals in magmatic-hydrothermal systems [J]. Geological Review, 2009, 55(1): 100–112.
- [20] 池国祥, 赖健清. 流体包裹体在矿床研究中的作用[J]. 矿床地质, 2009, 28(6): 850–866.
- CHI Guo-xiang, LAI Jian-qing. Roles of fluid inclusions in study of mineral deposits [J]. Mineral Deposits, 2009, 28(6): 850–866.
- [21] LAI Jian-qing, CHI Guo-xiang, PENG Sheng-lin, SHAO Yong-jun, YANG Bin. Fluid evolution in the formation of the Fenghuangshan Cu-Fe-Au deposit, Tongling, Anhui, China [J]. Economic Geology, 2007, 102: 949–970.
- [22] 赵财胜. 青海东昆仑造山带金、银成矿作用[D]. 长春: 吉林大学, 2004: 46–57.
- ZHAO Cai-sheng. Gold, silver metallogeny in eastern Kunlun orogenic Belt, Qinghai Province [D]. Changchun: Jilin University, 2004: 46–57.
- [23] 赵俊伟. 青海东昆仑造山带造山型金矿床成矿系列研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 87–95.
- ZHAO Jun-wei. Study on orogenic gold metallogeny series in eastern Kunlun orogenic belt, Qinghai Province [D]. Changchun: Jilin University, 2008: 87–95.
- [24] 张德全, 张慧, 丰成友, 余宏全, 李进文, 李大新. 柴北缘—东昆仑地区造山型金矿床的流体包裹体研究[J]. 中国地质, 2007, 34(5): 843–854.
- ZHANG De-quan, ZHANG Hui, FENG Cheng-you, LI Jin-wen, LI Da-Xing. Fluid inclusions in orogenic gold deposits in the northern Qaidam margin—east Kunlun region [J]. Geology in China, 2007, 34(5): 843–854.