

# 新疆东天山卡拉塔格矿集区梅岭铜锌(金)矿床成矿流体特征及地质意义<sup>\*</sup>

于明杰<sup>1,2</sup>, 王京彬<sup>1</sup>, 毛启贵<sup>1</sup>, 方同辉<sup>3</sup>, 张锐<sup>2</sup>

(1 北京矿产地质研究院, 北京 100012; 2 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

3 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012)

**摘要** 卡拉塔格矿集区梅岭铜(金)矿床位于新疆吐哈盆地南缘的古生代卡拉塔格隆起带中,在大地构造位置上处于大南湖-头苏泉晚古生代岛弧带中段的火山盆地中,赋存于一套基性-中性-酸性火山岩-火山碎屑岩和次火山岩中,矿体由细脉浸染状(M1)和热液脉状(M2)的铜矿体组成。文章在前人研究的基础上开展了矿床中石英流体包裹体的测温分析、成分分析及包裹体水的氢、氧同位素分析。研究发现,梅岭矿床中原生流体包裹体类型多为气液两相包裹体,个体较小,气相分数较小;流体包裹体均一温度为117~238℃,  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为2.4%~9.3%,为中-低温、中-低盐度流体;成矿压力为6.8~60.6 MPa,成矿深度约为0.2~2.0 km。流体包裹体气相成分以 $\text{H}_2\text{O}$ 为主,其次为 $\text{CO}_2$ ,并含有少量 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 等还原性气体;液相成分中阳离子以 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 为主,阴离子以 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 占主导地位,成矿流体属 $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{NaCl}$ 体系。成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为-5.75‰~-2.61‰,  $\delta\text{D}$ 值为-135.6‰~-117.2‰,表明成矿流体主要为岩浆水及大气降水的混合水。流体包裹体的研究成果和矿床地质特征显示,梅岭铜(金)矿床属于浅成低温热液矿床。梅岭铜锌(金)矿床成矿流体研究为矿床成因提供了成矿流体特征方面的证据,为该区成矿系统的综合研究提供了理论依据。

**关键词** 地球化学;流体包裹体;氢、氧同位素;梅岭铜锌(金)矿床;新疆东天山

**中图分类号**: P618.41; P618.43; P618.51

**文献标志码**: A

## Characteristics of ore-forming fluids of Meiling copper-zinc (gold) deposit in Kalatage ore concentration area of East Tianshan Mountains, Xinjiang, and their geological significance

YU MingJie<sup>1,2</sup>, WANG JingBin<sup>1</sup>, MAO QiGui<sup>1</sup>, FANG TongHui<sup>3</sup> and ZHANG Rui<sup>2</sup>

(1 Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China; 2 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China; 3 China Non-Ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China)

### Abstract

Located in the Paleozoic Kalatage uplift on the southern margin of Tu-Ha basin in eastern Xinjiang, the Meiling copper (gold) deposit occurs in the Mesozoic volcanic basin superimposed upon the middle part of Late Paleozoic Dananhu-Tousuquan accretionary arc. The orebodies are hosted by basic-neutral-acid volcanic, volcani-clastic and sub-volcanic rocks, consist of veinlet disseminated sulfide orebodies and a sulfide-silicate stockwork

<sup>\*</sup> 本文得到“十二五”国家科技支撑计划项目(编号: 2011BAB06B04-03)、中国地质调查局基础性公益性矿产地质调查项目(编号: DD20160071)和国土资源部公益性行业科研专项经费项目(编号: 201411026)的资助

第一作者简介 于明杰,男,1988年生,博士研究生,从事矿床学方面的研究。Email: sfyumingjie@foxmail.com

收稿日期 2015-05-26; 改回日期 2016-06-20。秦思婷编辑。

vein system. In this paper, the authors studied the homogenization temperature and the hydrogen and oxygen isotopic compositions of the fluid inclusions based on the previous researches, with the purpose of revealing the characteristics of the ore-forming fluid and the ore-forming material source and, what is more, exploring the genetic type of the Meiling deposit. The fluid inclusions mainly consist of aqueous fluid inclusions, characterized by very small and sparse and small gas to liquid ratios, the medium-low homogenization temperature (ranging from 117°C to 238°C) and the medium-low salinity (ranging from 2.4% to 9.3%). The ore-forming pressure varies from 6.8 MPa to 60.6 MPa, and ore-forming depth varies from 0.2 km to 2.0 km. The ore-forming fluid belongs to the  $\text{H}_2\text{O}$ -NaCl system with the gas phase mainly composed of  $\text{H}_2\text{O}$  together with minor  $\text{CO}_2$ , while the liquid phase is mainly composed of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ . The hydrogen and oxygen isotopic compositions of fluid inclusions show that the  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  value varies from  $-5.75\text{‰}$  to  $-2.61\text{‰}$  whereas the  $\delta\text{D}$  value varies from  $-136\text{‰}$  to  $-117\text{‰}$ . It is therefore held that the ore-forming fluid was the mixture of magmatic water and atmospheric water. In summary, all the geological and fluid characteristics indicate that the Meiling copper (gold) deposit belongs to the epithermal copper deposit. The research on ore-forming fluid of the Meiling copper (gold) deposit provides the evidence of the ore-forming fluid characteristics for the genesis of the deposit and fills in the research gap of previous studies. What's more, the research provides a train of theoretical basis for the comprehensive study of the metallogenic system.

**Key words:** geochemistry, fluid inclusion, hydrogen-oxygen isotope, Meiling copper-zinc (gold) deposit, East Tianshan Mountains, Xinjiang

东天山卡拉塔格铜多金属矿集区的矿床、矿点众多,成矿作用复杂,包括红海矿床早古生代 VMS 型铜锌多金属矿床(毛启贵等, 2010; 2015), 泥盆纪西二区砂卡岩型/斑岩型铁铜矿床和玉带斑岩型铜钼矿床(毛启贵等, 2015; Mao et al., 2014), 吸引了众多地质工作者的关注, 对其进行了矿床学、岩石学、地球化学、矿物学和年代学等方面的研究, 对卡拉塔格成矿地质背景、矿床成因、成矿规律以及地表硫化物次生氧化富集带的硫酸盐矿物成因等进行了探讨(秦克章等, 2002; 方同辉等, 2002; 毛启贵等, 2010; 缪宇等, 2007; 李文铅等, 2006; 唐俊华等, 2006; 高珍权等, 2006; 王京彬等, 2006; 许英霞等, 2006; 2007; 2008), 取得了突出的研究成果, 提高了对该地区的认识程度。但一直以来学者们对卡拉塔格矿集区早期发现的红山铜矿床、梅岭铜锌(金)矿床和红石铜锌矿床的成因类型、成矿规律、成矿时代及成矿动力学等方面的认识存在较大争议, 如有火山热液型(方同辉等, 2002)、浅成低温热液型(缪宇等, 2007; 许英霞等, 2008)和斑岩型(高珍权等, 2006)等认识, 在勘查实践中也有是否是 VMS 型矿床深部的脉状矿体? 亦或与泥盆纪斑岩-砂卡岩矿化有关的矿床等争论。梅岭铜锌(金)矿床位于卡拉塔格铜多金属矿集区的核部, 有其特殊的地质特征, 前人并未对其成矿流体特征进行系统的理论研究,

因此, 本文在系统的野外地质工作的基础上, 结合前人的研究成果, 开展了梅岭铜锌(金)矿床流体包裹体的显微测温 and 成分分析以及包裹体中水的氢、氧同位素分析, 以期揭示其成矿流体特征, 为矿床成因提供了成矿流体的证据, 探讨梅岭矿床的矿床成因类型, 为进一步研究梅岭矿床以及卡拉塔格铜多金属矿集区的成矿规律提供新的证据, 也为该区成矿系统的综合研究提供了新的理论依据。

## 1 区域地质背景

卡拉塔格铜多金属矿集区位于吐哈盆地南缘, 是一个与古生代海相火山活动及岩浆侵入有关的铜锌金(银)成矿带。卡拉塔格地区是吐哈盆地中的一个古生代构造隆起带(卡拉塔格隆起带), 位于大南湖—头苏泉晚古生代岛弧带的中段(图 1)。大南湖—头苏泉岛弧带成矿地质条件优越, 近年来相继发现了土屋斑岩铜矿带、卡拉塔格多金属成矿带、小热泉子块状硫化物矿床等规模较大的矿床(方同辉等, 2002; 唐俊华等, 2006; 毛启贵等, 2010; 2014)。

大南湖—头苏泉岛弧带北带发育一套早古生代海相钠质火山岩, 包括中奥陶统荒草坡群大柳沟组、中-上志留统红柳峡组, 为一套基性-中性-酸性粗火山(碎屑)岩, 系岛弧构造环境下形成的一套巨厚的

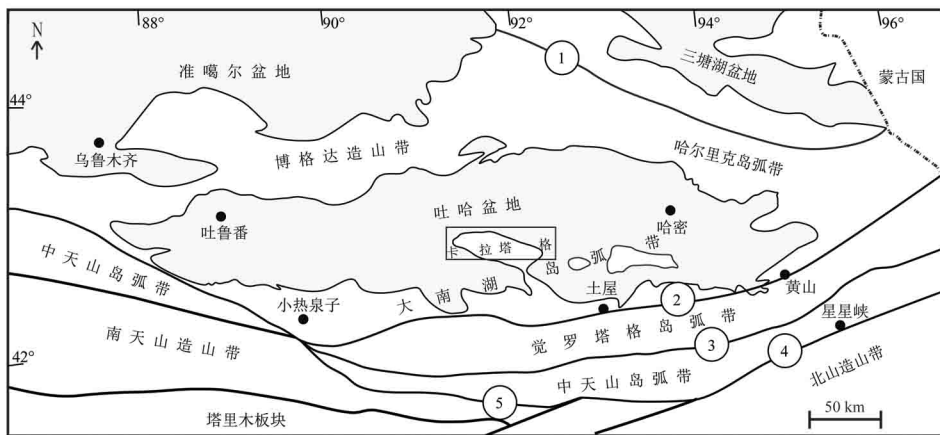


图1 卡拉塔格成矿带区域构造位置图(据李锦轶, 2004; Xiao et al., 2004)

①—卡拉麦里断裂带; ②—康古尔断裂带; ③—沙泉子断裂带; ④—星星峡断裂带; ⑤—卡瓦布拉克断裂带

Fig. 1 Tectonic location of the Kalatage metallogenic belt (after Li, 2004; Xiao et al., 2004)

①—Kelameili fault; ②—Kanggurtag fault; ③—Shaquanzi fault; ④—Xingxingxia fault; ⑤—Kawabulak fault

海相/海陆交互相火山岩-火山碎屑岩建造。火山活动连续且强烈,以喷溢相为主,裂隙式喷发为主要形式。火山岩为钙碱性系列岩石,岩石化学以低铝钛、富钠、贫钾为特征,岩石组合为玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩组合,以中酸性火山岩最发育,与近洋一侧的岛弧火山岩组合类型相似。卡拉塔格多金属成矿带在晚古生代发育一套钙碱性火山-火山碎屑岩,及少量碎屑岩、碳酸盐岩,矿化蚀变强烈(侯广顺等, 2005; 芮宗瑶等, 2002; 唐俊华等, 2006; 张连昌等, 2004; 2006)。

大南湖—头苏泉岛弧带侵入岩较为发育,岩石类型齐全,有橄榄岩、辉长岩、闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩等,以中酸性深成侵入岩为主。岩体侵入时代为志留纪—二叠纪。其中,泥盆纪侵入岩分布范围最广,石炭纪—二叠纪次之,志留纪侵入岩出露较为局限(曹福根等, 2006; 陈富文等, 2005; 郭华春等, 2006; 李华芹等, 2004; 宋彪等, 2002; 孙桂华等, 2005; 2007; 吴华等, 2006)。

卡拉塔格铜多金属矿集区位于大南湖岛弧带北带中段卡拉塔格古生代隆起内,其核部为一套古生代火山岩-火山碎屑岩,早泥盆统一侏罗系沿卡拉塔格隆起带的边部发育,由核部向外逐渐变新,是一原生复背斜构造(毛启贵等, 2015)。卡拉塔格隆起带核部古生代火山-火山碎屑岩地层是卡拉塔格成矿带含矿建造,为一套基性-中性-酸性火山-火山碎屑岩和次火山岩,包括玄武岩、安山岩、英安岩、流纹

岩、火山角砾岩、熔结凝灰岩、凝灰岩、热水硅质岩、英安斑岩、次火山岩等。其中,早古生代的玄武岩在东北部带状分布,晚古生代发育的中酸性火山岩-碎屑岩产于玄武岩之上,受串珠状分布的火山机构控制(毛启贵等, 2010; 2014),梅岭铜锌(金)矿床即位于卡拉塔格隆起带的中东部。

卡拉塔格地区侵入岩较发育,时代从奥陶纪—二叠纪,以深成相为主,浅成相次之。岩石类型有辉长岩、辉绿岩、闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩等。区内最大的岩体为卡拉塔格岩体,面积约 70 km<sup>2</sup>(李文铅等, 2006),其他侵入岩岩体规模较小,以岩脉、不规则岩体、岩墙等形态产出,包括辉长岩、花岗闪长岩、似斑状二长花岗岩、斑状二长花岗岩、文象花岗岩及石英斑岩等。

## 2 矿床地质特征

梅岭铜锌(金)矿床位于受 NWW 向、SN 向和近 EW 向断裂控制的晚古生代陆相火山机构内(图 2),矿区内出露了玄武岩、安山岩、英安(玢)岩、流纹岩、火山角砾岩、岩屑晶屑凝灰岩、凝灰质熔岩、熔结凝灰岩、英安斑岩、花岗闪长岩等(图 2)。矿化带受 NWW 向断裂控制,东西长 1200 m,宽 600 m。矿种以铜为主,次有锌、金,伴有银。围岩蚀变强烈,主要有硅化-绢云母化带、黄铁矿-绿泥石化带、绿帘石化-铁碧玉化带。硅化-绢云母化带主要沿石英脉状矿体分布,黄铁矿-绿泥石化带分布在硅化-绢云母化带

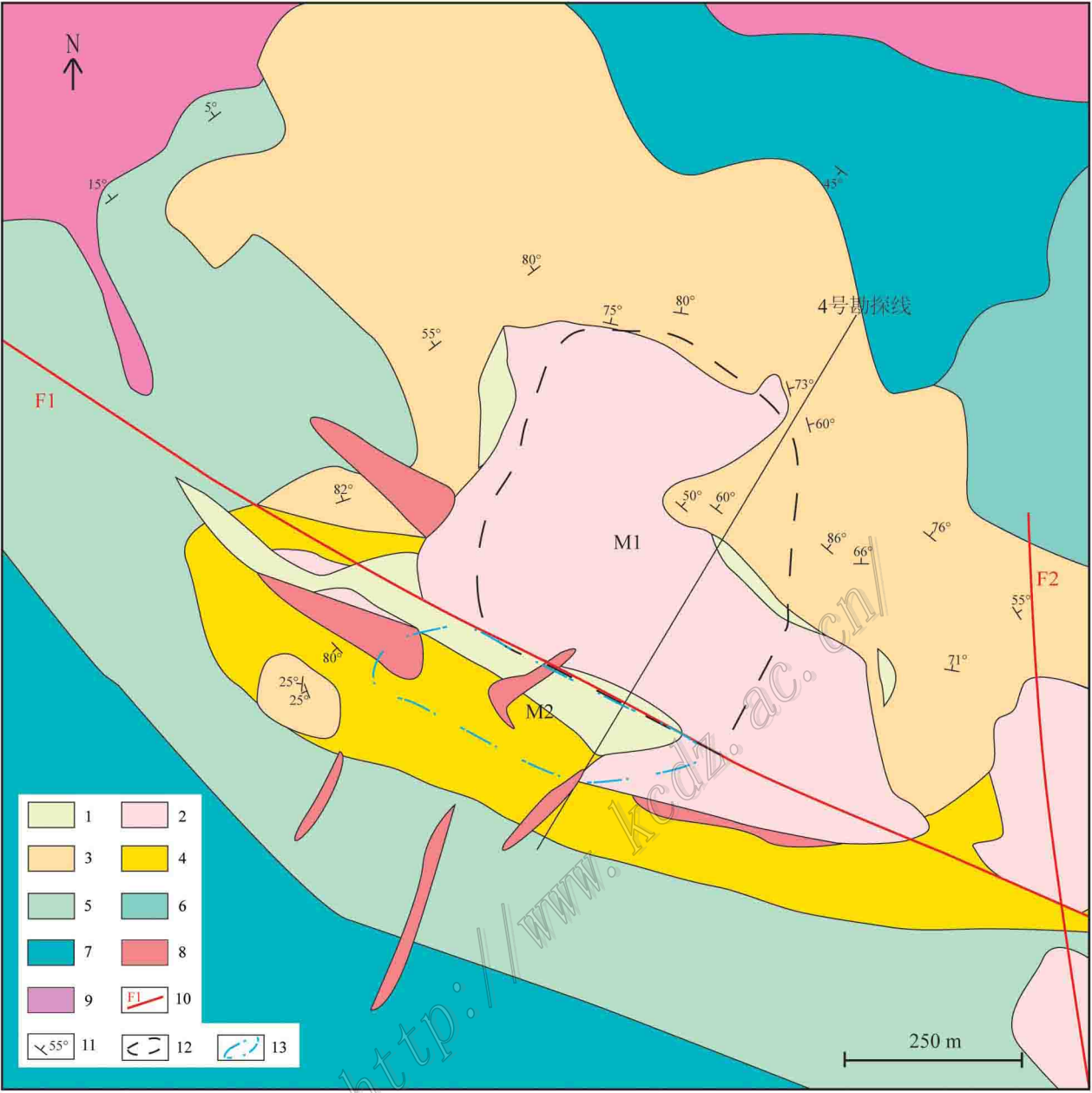


图 2 梅岭矿区地质图(据毛启贵等, 2014)

1—凝灰质砂岩/含热水沉积岩; 2—石英流纹斑岩(含矿脉); 3—含角砾火山熔岩/熔结凝灰岩; 4—火山集块岩; 5—酸性火山熔岩/火山碎屑岩; 6—熔结凝灰岩; 7—安山岩-玄武岩; 8—晚古生代花岗岩类; 9—早古生代花岗岩类; 10—断层; 11—实测产状; 12—M1 矿体范围; 13—M2 矿体范围

Fig. 2 Geological map of the Meiling deposit (after Mao et al., 2014)

1—Tuff sandstone/hydrothermal sedimentary rock; 2—Quartz rhyolite porphyry (mineralized); 3—Breccia lava/ignimbrite; 4—Volcanic agglomerate; 5—Acid lava/volcaniclastic rocks; 6—Ignimbrite; 7—Andesite-basaltic rocks; 8—Late Paleozoic granitic intrusion; 9—Early Paleozoic granitic intrusion; 10—Fault; 11—Measured attitude; 12—M1 orebody range; 13—M2 orebody range

外围,再向外围为绿泥石-绿帘石-铁碧玉化带。以矿区F1断裂为界,可分为梅岭南侧矿段(M2矿体)、梅岭北侧矿段(M1矿体),M1矿体发育细脉浸染状铜矿体,M2矿体发育热液脉状铜矿体(图2),前人

研究认为其可能为同一矿体,只是由于断裂构造以及含矿围岩和容矿空间的差异,造就了M1矿体和M2矿体的矿化富集程度的差异(毛启贵等,2014; 2015)。



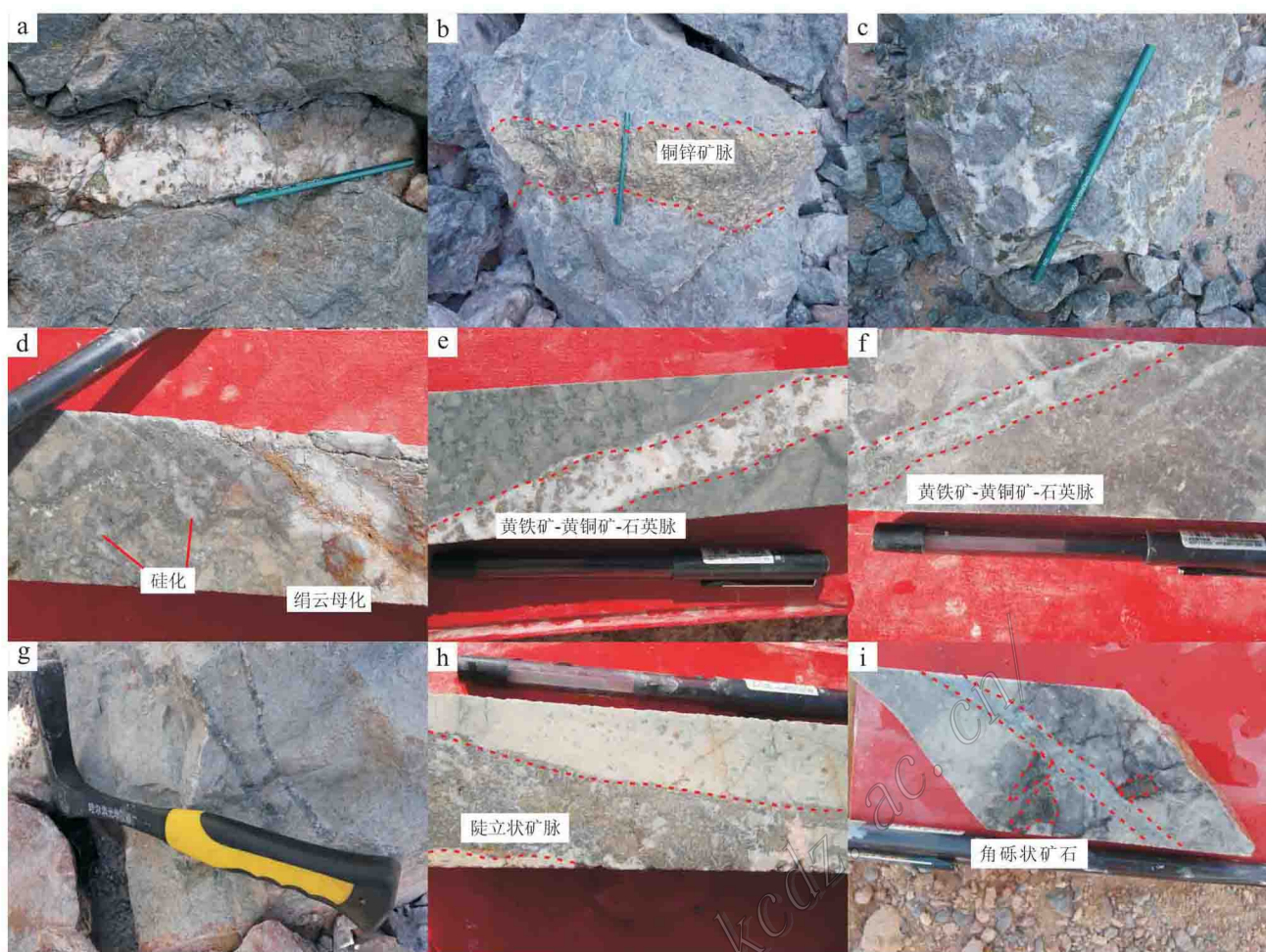


图3 梅岭矿床围岩及矿体特征图

a. 近地表Ⅰ阶段石英脉; b. Ⅱ阶段铜锌矿脉; c. Ⅱ阶段网脉状矿石; d. 近矿围岩强硅化、绢云母化、黄铁矿化; e. Ⅰ阶段石英脉; f. Ⅱ阶段硫化物矿脉; g. Ⅱ阶段铜锌矿脉; h. Ⅱ阶段陡立状矿脉; i. 角砾状铜锌矿石被含金石英脉穿切

Fig. 3 Characteristics of the country rock alteration and the ore/orebody of the Meiling deposit

a. The 1st stage quartz vein; b. The 2nd staged Cu-Zn ore vein; c. The 2nd stage stockwork; d. Wall rock alterations of silicification, sericitization and pyritization; e. The 1st stage quartz vein; f. The 2nd stage sulfide-rich quartz vein; g. The 2nd stage Cu-Zn ore vein; h. The 2nd stage ore vein; i. Cu-Zn breccia ore penetrated by auriferous quartz vein

梅岭南侧矿段(M2矿体,图2)主要为热液脉状铜锌矿体,成矿明显受NW向F1断裂及其南侧火山角砾集块岩、火山角砾岩筒旁侧构造裂隙带及其深部玄武岩局部隆起的控制。通过详细坑、钻工程揭露,在F1断裂南侧发现NW向的火山角砾集块岩带,在角砾岩筒北东侧发现有埋深11~80 m缓倾斜的毯状铜矿体(M2矿体),矿体由走向北东陡倾斜铜矿脉密集带组成,矿体上覆围岩为1~5 m厚的凝灰岩,局部见少量铜锌矿脉穿插;矿脉群赋矿围岩为具黄铁绢云岩化蚀变的火山角砾熔岩、英安岩或安山岩。

M2矿体的矿石类型主要有细脉状、网脉状,大多为黄铁矿-黄铜矿(-闪锌矿)-石英细脉,可见梳状构造、晶簇/晶洞状等构造(图3a~c)。金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿,局部极少量的斑铜矿,地表矿体可见褐铁矿、孔雀石、蓝铜等。非金属矿物主要为石英、绢云母(图3d)及少量方解石、绿泥石、绿帘石、斜长石、角闪石、黑云母等。矿石结构以半自形-他形,微细-中粒结构为主,碎裂结构、交代残余结构次之。

梅岭北侧矿段(M1矿体,图2)位于梅岭F1断裂以北,矿体埋深22~74 m。矿化类型为浸染状-细

脉状。成矿元素以铜、锌、金为主。石英斑岩、流纹斑岩构成超浅成酸性侵入岩相，与灰绿色火山岩(熔岩)的穿插关系十分明显，深灰色-灰绿色闪长玢岩、石英闪长玢岩侵入时代比酸性次火山岩稍晚。石英斑岩含网脉状铜锌矿，普遍发育硅化、黄铁矿化、褐铁矿化、黄铜矿化、黄钾铁矾化，局部可见绢云母化。流纹斑岩中的铜矿化主要呈细脉状-浸染状产出，多与黄铁矿-石英脉伴生。蚀变强烈，主要蚀变为硅化、褐铁矿化、黄铁矿化，少量碳酸盐化、绢云母化、高岭土化、黄钾铁矾化。深灰色-灰绿色闪长玢岩、石英闪长玢岩中可见细脉状铜锌矿，蚀变主要为碳酸盐化、硅化、绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化、黄铜矿化，次有高岭土化、孔雀石化等。

M1 矿体的矿石类型主要有浸染状、细脉-浸染状、网脉状、浸染-网脉状。大多数矿石为黄铁矿-黄铜矿(-闪锌矿)-石英细脉，可见梳状构造、晶簇/晶洞状等构造(图 3e~i)。矿石中金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、伴生金，少量辉铜矿。氧化矿物

有褐铁矿、孔雀石等。脉石矿物主要有石英、斜长石、角闪石、黑云母、绿泥石、绿帘石、绢云母等。黄铜矿以小细脉状、网脉状陡倾斜产出。在梅岭矿区部分钻孔及坑道中见有辉铜矿细脉、闪锌矿细脉及浸染状黄铜矿。

根据前人研究成果，以及 M1 和 M2 矿体的矿石类型相似，矿化蚀变特征相近等野外地质特征、脉体穿切关系、矿化蚀变特征及矿物组合关系(图 3)，可将 M1 和 M2 矿体的成矿阶段进行统一的划分，从早到晚可分为 3 个成矿阶段：(Ⅰ) 石英-黄铁矿阶段，以形成规模不等的石英脉为特征，该阶段形成的矿石中，普遍发育浸染状黄铁矿；(Ⅱ) 多金属硫化物-石英阶段，以发育石英脉中存在多种类型的金属硫化物为特征，常见金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿等，该阶段是矿区矿化最强烈的阶段；(Ⅲ) 碳酸盐-石英阶段，以发育大量碳酸盐脉为特征，同时，可见少量的黄铁矿及铁氧化物，该阶段是热液成矿作用的结束期，成矿作用已减弱。

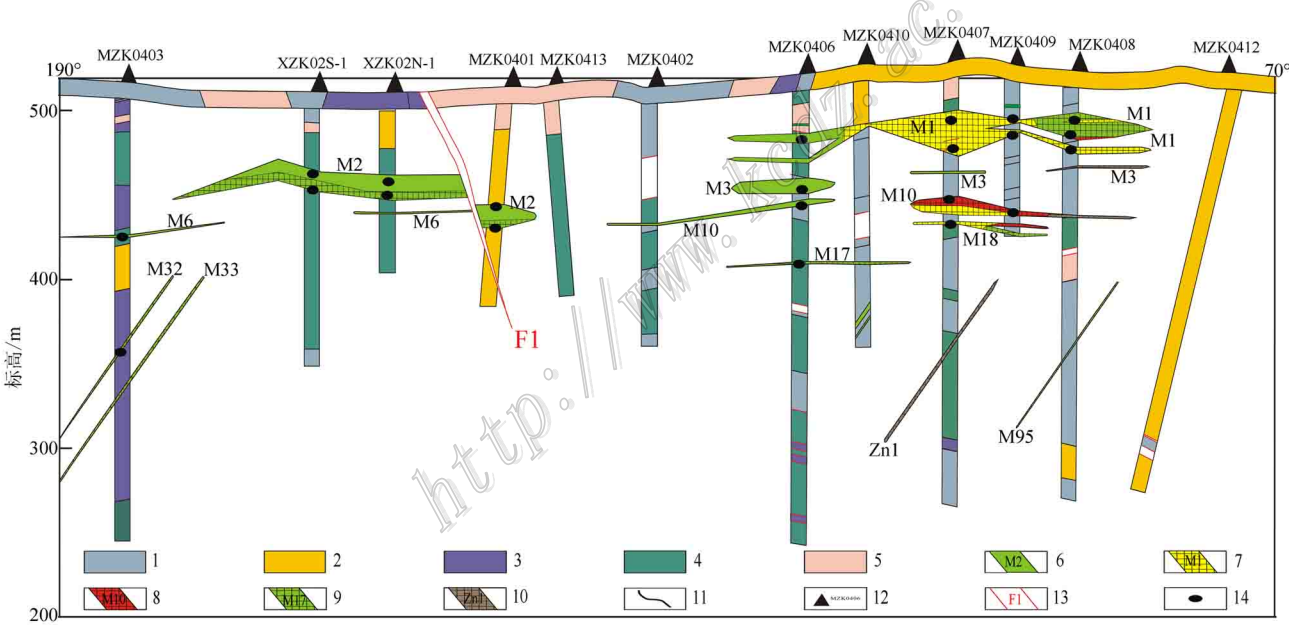


图 4 梅岭矿床四号勘探线剖面图

1—英安岩；2—英安质熔岩；3—英安质岩屑凝灰岩；4—火山角砾岩；5—石英斑岩；6—铜矿体及编号；7—铜金矿体；8—铜锌金矿体；9—铜锌矿体；10—锌矿体及编号；11—地层分界线；12—钻孔位置及编号；13—断裂；14—采样位置

Fig. 4 Exploration profiles along line 4 of the Meiling deposit

1—Dacite; 2—Dacitic lava; 3—Dacitic lithic tuff; 4—Volcanic breccia; 5—Quartz porphyry; 6—Copper orebody and it's number; 7—Copper-gold orebody; 8—Copper-zinc-gold orebody; 9—Copper-zinc orebody; 10—Zinc orebody and it's number; 11—Stratigraphic boundary; 12—Location and serial number of drill hole; 13—Fault; 14—Sampling location



### 3 流体包裹体特征

#### 3.1 样品特征与测试方法

本次研究的样品主要采自梅岭铜锌(金)矿床 4 号勘探线上的典型钻孔 M1 和 M2 矿体的钻孔岩芯(图 4)。包裹体样品采自不同位置的含石英英脉(金属矿物主要是黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿及少量辉铜矿),代表了梅岭铜锌(金)矿床形成的主要成矿阶段(即 II 阶段)。

石英流体包裹体的显微测温分析是在有色金属矿产地质调查中心的流体包裹体实验室的英国 Linkam THMS 600 型冷热台上完成,测试温度范围是  $-196 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 。测试过程中采用 Wilkinson (2001)总结的冷冻-加热法来记录相变温度点。测试中,气液两相均一时的升温速率一般为  $2 \sim 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,最后冰晶消失时的升温速率为  $0.1 \sim 0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,利用流体包裹体计算程序 MacFlincon (Brown et al., 1995)对测试结果进行了数据计算。根据 Hall 等(1988)提出的  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  体系盐度-冰点公式求得水溶液包裹体盐度。

石英流体包裹体的气液相成分分析是在中国科学院地质与地球物理研究所完成的。流体包裹体气相成分测定由日本真空技术株式会社生产的 RG202 四极质谱(QMS)完成,色谱仪最低检出限为  $1 \times 10^{-6}$ 。流体包裹体的液相成分分析采用加热爆裂法,使用仪器为日本岛津公司 Shimadzu HIC6A 型离子色谱仪进行测试,其最低检出限:阴离子为  $1 \times 10^{-9}$ ,阳离子为  $1 \times 10^{-6}$ (朱和平等, 2001)。标准物质来源于国家标准物质研究中心。

石英流体包裹体的氢、氧同位素分析在核工业北京地质研究院地质测试分析中心完成。流体包裹体氢同位素用爆裂法取水,铬法制氢(万德芳等, 2005),爆裂温度为  $550^{\circ}\text{C}$ ;氧同位素用  $\text{BrF}_5$  法。氢、氧同位素采用 MAT253 质谱计测定,氢、氧同位素采用的国际标准为 SMOW。氧同位素分析精度为  $\pm 0.2\text{‰}$ ,氢同位素分析精度为  $\pm 2\text{‰}$ 。氧同位素测定的是石英中的氧同位素,石英与水的氧同位素平衡公式采用公式 (Clayton et al., 1972):  $1000 \ln \alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 / T^2 - 3.40$ , 其中,  $T$  为流体包裹体的均一温度的平均值,换算成包裹体中水的氧同位素。

#### 3.2 流体包裹体岩相学特征

梅岭矿床的成矿阶段包裹体较为发育,次生包裹体发育较少,呈串珠状,较易区分,原生流体包裹体类型较为单一,主要为气液两相包裹体及部分无气泡的纯液体包裹体,包裹体呈不规则形、椭圆形、长条形或近圆形(图 5),室温( $25^{\circ}\text{C}$ )下呈富液两相( $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{V}_{\text{H}_2\text{O}}$ ),多数  $5 \sim 6 \mu\text{m}$ ,气相分数较小,多小于  $5\% \sim 10\%$ ,以无色透明者为主,少数为浅褐色或浅灰色,气泡呈小黑点在液相中跳动,气液两相界线清晰(图 5)。

#### 3.3 流体包裹体均一温度和盐度

对梅岭铜锌(金)矿床 M1 和 M2 矿体的主成矿阶段(II 阶段)的代表性样品中的流体包裹体进行显微测温研究,测试结果见表 1 和图 6。

M1 矿体成矿阶段的石英流体包裹体的冰点温度( $t_{\text{m,ice}}$ )为  $-3.5 \sim -1.4^{\circ}\text{C}$ ,均一温度为  $133 \sim 214^{\circ}\text{C}$ ,平均值  $164^{\circ}\text{C}$ 。应用  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  体系盐度-冰点公式(Hall et al., 1988):

$$W_{\text{NaCl}} = 0.00 + 1.78t_{\text{m}} - 0.0442t_{\text{m}}^2 + 0.000557t_{\text{m}}^3$$

其中, $t_{\text{m}}$  为冰点温度( $^{\circ}\text{C}$ );求得  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为  $2.4\% \sim 5.7\%$ ,平均值  $3.9\%$ 。

M2 矿体成矿阶段的石英流体包裹体的冰点温度( $t_{\text{m,ice}}$ )为  $-6.1 \sim -0.8^{\circ}\text{C}$ ,均一温度为  $117 \sim 238^{\circ}\text{C}$ ,平均值为  $170^{\circ}\text{C}$ 。应用  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  体系盐度-冰点公式 (Hall et al., 1988),求得  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为  $1.4\% \sim 9.3\%$ ,平均值  $2.5\%$ 。

梅岭铜锌(金)矿床 M2 矿体的石英流体包裹体的均一温度略高于 M1 矿体的石英流体包裹体的均一温度,M2 矿体的均一温度和盐度范围较 M1 矿体稍大。但总体而言,M1 与 M2 矿体的成矿流体具有相似的均一温度和盐度特征,均为中-低温、中-低盐度的流体。

#### 3.4 流体包裹体群体成分分析

本次研究工作,选择了 6 件成矿阶段的石英样品进行群体成分分析。其中,14MZK6301-1 和 14MZK3102-2 为 M1 矿体的钻孔岩芯样品,其余为 M2 矿体的钻孔岩芯样品。流体包裹体气相成分分析结果见表 2,液相成分分析结果见表 3。由表 2 可知, $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  表示摩尔比值, $R$  为流体的还原参数,  $R = (\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{H}_2\text{S})/\text{CO}_2$ ;由于热爆过程中的氧化作用,表 3 中  $\text{SO}_4^{2-}$  代

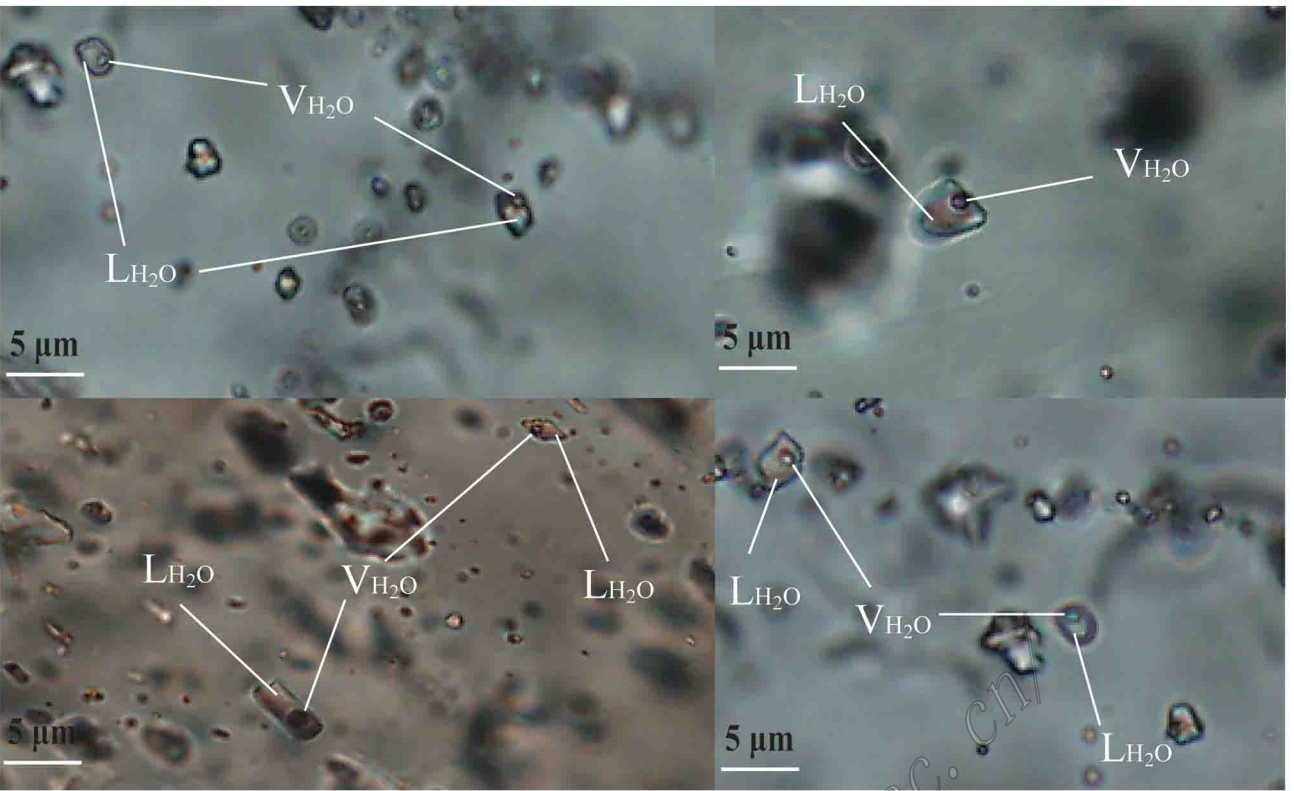


图 5 梅岭矿床包裹体显微照片  
L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>—液态水; V<sub>H<sub>2</sub>O</sub>—气态水  
Fig. 5 Microphotographs of fluid inclusions of the Meiling deposit  
L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>—Liquid water; V<sub>H<sub>2</sub>O</sub>—Vapour water

表 1 梅岭矿床流体包裹体显微测温结果  
Table 1 Microthermometric data of the Meiling deposit

| 样号       | 成矿阶段 | 测点数 | $t_{h, tot}/^{\circ}\text{C}$ | $t_{m, ice}/^{\circ}\text{C}$ | $w(\text{NaCl}_{eq})/\%$ |
|----------|------|-----|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 12B28    | M1   | 12  | 156 ~ 208                     | -2.9 ~ -2.0                   | 3.1 ~ 3.9                |
| 12B35    | M1   | 13  | 149 ~ 205                     | -3.1 ~ -2.0                   | 2.7 ~ 3.5                |
| 12B40    | M1   | 14  | 146 ~ 214                     | -2.8 ~ -2.0                   | 3.3 ~ 4.3                |
| 12B47    | M1   | 11  | 133 ~ 187                     | -3.3 ~ -1.6                   | 3.1 ~ 5.5                |
| 12B62    | M1   | 13  | 148 ~ 201                     | -3.2 ~ -1.9                   | 2.7 ~ 5.5                |
| 12B68    | M1   | 12  | 143 ~ 182                     | -2.9 ~ -1.5                   | 3.2 ~ 4.6                |
| 12B70    | M1   | 15  | 153 ~ 208                     | -3.0 ~ -1.7                   | 3.4 ~ 5.5                |
| 12B75    | M1   | 14  | 138 ~ 185                     | -2.9 ~ -1.4                   | 2.4 ~ 7.1                |
| 12B84    | M1   | 13  | 146 ~ 198                     | -3.5 ~ -2.0                   | 3.1 ~ 6.2                |
| 12B91    | M1   | 12  | 139 ~ 192                     | -2.7 ~ -1.4                   | 2.4 ~ 5.4                |
| 12B96    | M1   | 11  | 156 ~ 205                     | -3.4 ~ -2.0                   | 3.3 ~ 4.5                |
| 12B98    | M1   | 13  | 149 ~ 214                     | -3.5 ~ -1.7                   | 2.7 ~ 4.1                |
| 12B50    | M2   | 13  | 145 ~ 190                     | -2.9 ~ -1.4                   | 2.4 ~ 7.5                |
| 12B58    | M2   | 14  | 139 ~ 186                     | -3.3 ~ -1.8                   | 2.4 ~ 5.7                |
| 14M2N-3  | M2   | 14  | 121 ~ 174                     | -4.4 ~ -1.2                   | 3.4 ~ 4.0                |
| 14M2N-4  | M2   | 11  | 140 ~ 207                     | -4.8 ~ -1.2                   | 3.5 ~ 7.5                |
| 14M2N-8  | M2   | 15  | 145 ~ 238                     | -4.1 ~ -0.8                   | 3.6 ~ 6.5                |
| 14M2N-9  | M2   | 14  | 117 ~ 197                     | -6.1 ~ -2.1                   | 3.7 ~ 9.3                |
| 14M2N-10 | M2   | 17  | 130 ~ 193                     | -4.2 ~ -1.3                   | 3.5 ~ 6.7                |
| 14M2N-13 | M2   | 11  | 149 ~ 203                     | -4.5 ~ -1.9                   | 3.5 ~ 7.1                |

注:  $t_{h, tot}$  为完全均一温度;  $t_{m, ice}$  为冰点温度。

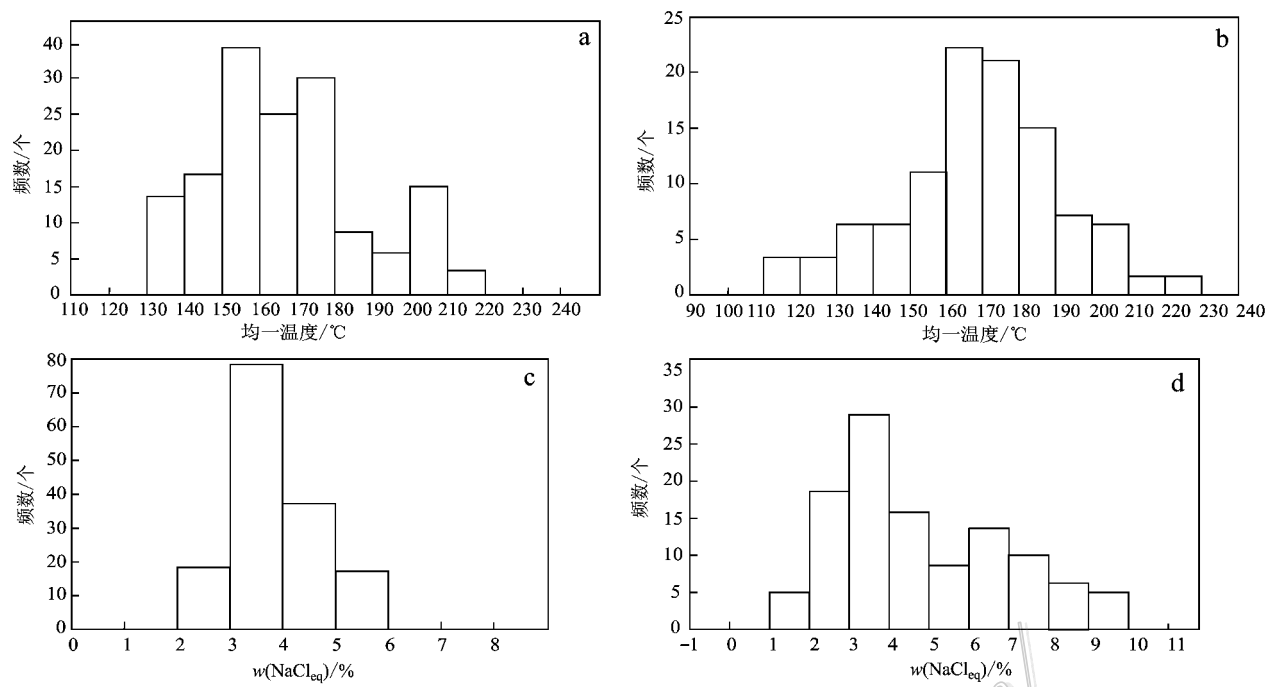


图 6 梅岭矿床主成矿阶段(Ⅱ阶段)石英流体包裹体均一温度和盐度直方图

a. M1 矿体均一温度直方图; b. M2 矿体均一温度直方图; c. M1 矿体盐度直方图; d. M2 矿体盐度直方图

Fig. 6 Histogram of homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions in quartz from stage Ⅱ

a. Uniform temperature histogram of M1 orebody; b. Uniform temperature histogram of M2 orebody; c. Salinity histogram of M1 orebody; d. Salinity histogram of M2 orebody

表 2 梅岭矿床流体包裹体气相成分

Table 2 Gas components of fluid inclusions in the Meiling deposit

| 样品编号        | 寄主矿物 | φ(B)/%           |                |       |                |                 |                 |                               |                  | 摩尔比值                             |                                   |                                 |        |
|-------------|------|------------------|----------------|-------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------|
|             |      | H <sub>2</sub> O | N <sub>2</sub> | Ar*   | O <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | H <sub>2</sub> S | CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O | CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> | R      |
| 14M001-12   | 石英   | 98.89            | 0.045          | 0.014 | n. d           | 0.911           | 0.038           | 0.016                         | 0.0309           | 24.072                           | 0.0092                            | 20.211                          | 0.0929 |
| 14M0202-3   | 石英   | 98.64            | 0.095          | 0.024 | n. d           | 1.170           | 0.073           | n. d.                         | 0.0025           | 15.871                           | 0.0118                            | 12.269                          | 0.0652 |
| 14M2N-11    | 石英   | 98.84            | 0.069          | 0.018 | n. d           | 0.990           | 0.064           | n. d.                         | 0.0103           | 15.277                           | 0.0100                            | 14.240                          | 0.0759 |
| 14MZK6303-1 | 石英   | 98.79            | 0.049          | 0.009 | n. d           | 1.111           | 0.032           | n. d.                         | 0.0052           | 34.635                           | 0.0112                            | 22.536                          | 0.0335 |
| 14MZK3102-2 | 石英   | 98.67            | 0.045          | 0.011 | n. d           | 1.216           | 0.041           | 0.011                         | 0.0040           | 29.882                           | 0.0123                            | 26.901                          | 0.0458 |
| 14M0202-1   | 石英   | 97.67            | 0.246          | 0.063 | n. d           | 1.825           | 0.194           | n. d.                         | 0.0020           | 9.416                            | 0.0187                            | 7.421                           | 0.1070 |

注：\* 为实验室给出的参考值；n. d. 为微量，未检测出；R = (CH<sub>4</sub> + C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> + H<sub>2</sub>S)/CO<sub>2</sub> 为流体还原参数。

表 3 梅岭矿床流体包裹体液相成分

Table 3 Liquid components of fluid inclusions in the Meiling deposit

| 样品编号        | w(B)/(μg/g)    |                 |                               |                 |                |                  |                  | 摩尔比值                            |                                   |                                                |
|-------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------|
|             | F <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> /K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> /Ca <sup>2+</sup> | Cl <sup>-</sup> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> |
| 14M001-12   | n. d.          | 3.03            | 8.910                         | 1.78            | 2.520          | n. d.            | 1.49             | 0.708                           | 1.193                             | 0.340                                          |
| 14M0202-3   | n. d.          | 0.57            | 0.966                         | 0.53            | 0.465          | n. d.            | 0.213            | 1.142                           | 2.493                             | 0.590                                          |
| 14M2N-11    | n. d.          | 5.37            | 2.710                         | 2.02            | 1.630          | n. d.            | 0.852            | 1.240                           | 2.366                             | 1.982                                          |
| 14MZK6303-1 | n. d.          | 2.76            | 2.320                         | 1.82            | 0.696          | n. d.            | 0.426            | 2.621                           | 4.282                             | 1.187                                          |
| 14MZK3102-2 | n. d.          | 4.56            | 0.966                         | 1.63            | 0.543          | n. d.            | 1.490            | 3.006                           | 1.092                             | 4.720                                          |
| 14M0202-1   | n. d.          | .19             | 0.774                         | 0.49            | 0.813          | n. d.            | n. d.            | 0.601                           |                                   | 0.244                                          |

注：n. d. 为微量，未检测出。

表 4 梅岭矿床氢、氧同位素测试结果

Table 4 Hydrogen and oxygen isotope data of the Meiling deposit

| 样品编号  | 测试对象 | $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$ | $\delta\text{D}/\text{‰}$ | $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}/\text{‰}$ |
|-------|------|----------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|
| 12B23 | 石英   | 9.2                                          | -117.2                    | -5.75                                     |
| 12B26 | 石英   | 11.1                                         | -128.9                    | -3.11                                     |
| 12B40 | 石英   | 11.3                                         | -125.9                    | -2.91                                     |
| 12B49 | 石英   | 11.6                                         | -128.2                    | -2.61                                     |
| 12B77 | 石英   | 10.3                                         | -135.6                    | -3.91                                     |
| 12B96 | 石英   | 11.6                                         | -122.1                    | -4.24                                     |

表了包裹体中所有的含硫物相,  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  均表示摩尔比值。梅岭矿床石英流体包裹体的气相成分(表 2)以  $\text{H}_2\text{O}$  为主, 其次为  $\text{CO}_2$ , 再次为  $\text{N}_2$ , 并含有少量  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$  等还原性气体, 还原参数  $R$  为 0.0335~0.1070。液相成分(表 3)中,  $\text{F}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  未检测出,  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  比值有 2 个样品小于 1, 其余的大于 1,  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  比值均大于 1。

3.5 流体氢、氧同位素组成

氢、氧同位素分析共采集了 6 件成矿阶段的石英单矿物样品进行测试, 均为 M1 矿体的钻孔岩芯样品。石英与水的氧同位素平衡公式采用公式 (Clayton et al., 1972):  $1000 \ln \alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 / T^2 - 3.40$ , 其中,  $T$  为绝对温度(K), 是流体包裹体均一温度的平均值。计算出与石英相平衡的热液水的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  值(表 4)。由分析测试结果(表 4)可知, 石英的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  值为 9.2‰~11.6‰, 平均值 10.85‰。包裹体中液相氢同位素  $\delta\text{D}$  的实测值为 -135.6‰~-117.2‰, 平均值 -126.3‰。与石英相平衡的热液水氧同位素  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  值为 -5.75‰~-2.61‰, 平均值 -3.76‰。

4 讨论

4.1 成矿流体密度、压力和深度条件

梅岭矿床 M1 矿体石英脉中的包裹体, 利用盐水溶液包裹体的密度计算经验公式(刘斌等, 1987):  $\rho = a + b \times t_h + c \times t_h^2$ , 其中,  $\rho$  为流体密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $t_h$  为均一温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为无量纲参数。求得 M1 矿体的包裹体密度为 0.80~0.96  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 平均值 0.93  $\text{g}/\text{cm}^3$ (表 5), M2 矿体的包裹体密度为 0.80~0.98  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 平均值 0.91  $\text{g}/\text{cm}^3$ (表 5), 均属于较低密度流体。

利用流体压力计算的公式(邵洁涟, 1988):

$p = p_0 \times t_h / t_0 (10^5 \text{ Pa})$ , 其中,  $p_0 = 219 + 2620 \times \omega$ ,  $t_0 = 374 + 920 \times \omega$ ,  $p$  为成矿压力(MPa),  $p_0$  为初始压力(MPa),  $t_h$  为均一温度( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_0$  为初始温度( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\omega$  为盐度(%)。计算得出 M1 矿体的成矿压力为 34.40~56.70 MPa, 主要集中于 40~47 MPa, 平均值为 43.1 MPa(表 5); M2 矿体的成矿压力为 6.8~60.6 MPa, 主要集中于 25~37 MPa, 平均值为 30.1 MPa(表 5)。

成矿深度是金属成矿地质体的重要空间参数, 受到岩浆侵位深度、热液饱和和出溶深度、断裂裂隙发育程度、多孔介质的渗透率等诸多因素制约和影响, 成矿深度又是主要成矿元素卸载沉淀的富集部位, 因此还受环境物理化学条件、地球化学、成矿介质-流体中成矿元素溶解度等因素的约束(张德会等, 2011)。本文仅就流体包裹体进行了初步的讨论, 还有很多因素需要考虑, 许多研究需要深入。

利用成矿深度计算的公式(邵洁涟, 1988):

$$H = p / (300 \times 10^5)$$

其中,  $H$  为成矿深度(km),  $p$  为成矿压力(MPa)。计算得出 M1 矿体的成矿深度为 1.1~1.9 km, 平均值 1.4 km(表 5); M2 矿体的成矿深度为 0.2~2.0 km, 平均值 1.0 km(表 5), 均属于浅成矿深度。

表 5 梅岭矿床流体盐度、密度、成矿压力与成矿深度数据

Table 5 Salinity, density, trapping pressure and depth data of the Meiling deposit

| 样号       | 测点<br>数 | $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$<br>/% | 密度/<br>( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 压力/<br>MPa | 深度/km   |
|----------|---------|------------------------------------|-----------------------------------|------------|---------|
| 12B28    | 12      | 3.1~3.9                            | 0.89~0.94                         | 39.3~53.2  | 1.1~1.7 |
| 12B35    | 13      | 2.7~3.5                            | 0.88~0.94                         | 38.3~54.5  | 1.2~1.6 |
| 12B40    | 14      | 3.3~4.3                            | 0.89~0.94                         | 37.5~53.5  | 1.1~1.6 |
| 12B47    | 11      | 3.1~5.5                            | 0.89~0.96                         | 35.0~53.1  | 1.2~1.8 |
| 12B62    | 13      | 2.7~5.5                            | 0.88~0.96                         | 37.3~55.1  | 1.1~1.7 |
| 12B68    | 12      | 3.2~4.6                            | 0.89~0.95                         | 35.0~53.4  | 1.3~1.7 |
| 12B70    | 15      | 3.4~5.5                            | 0.87~0.96                         | 35.2~53.2  | 1.1~1.6 |
| 12B75    | 14      | 2.4~7.1                            | 0.89~0.95                         | 35.5~55.3  | 1.3~1.7 |
| 12B84    | 13      | 3.1~6.2                            | 0.83~0.94                         | 36.8~54.3  | 1.2~1.9 |
| 12B91    | 12      | 2.4~5.4                            | 0.88~0.96                         | 35.8~56.8  | 1.1~1.5 |
| 12B96    | 11      | 3.3~4.5                            | 0.89~0.93                         | 35.5~54.6  | 1.3~1.9 |
| 12B98    | 13      | 2.7~4.1                            | 0.88~0.94                         | 34.8~55.1  | 1.1~1.7 |
| 12B50    | 11      | 3.5~7.1                            | 0.78~0.96                         | 34.5~51.2  | 1.1~1.7 |
| 12B58    | 14      | 2.4~5.7                            | 0.87~0.94                         | 34.7~45.7  | 1.2~1.6 |
| 14M2N-3  | 14      | 3.4~4.0                            | 0.90~0.95                         | 7.1~45.0   | 0.2~1.4 |
| 14M2N-4  | 11      | 3.5~7.5                            | 0.89~0.9                          | 9.5~55.1   | 0.3~1.8 |
| 14M2N-8  | 15      | 3.6~6.5                            | 0.81~0.93                         | 8.5~60.6   | 0.2~2.0 |
| 14M2N-9  | 14      | 3.7~9.3                            | 0.87~0.96                         | 6.8~52.6   | 0.2~1.7 |
| 14M2N-10 | 17      | 3.5~6.7                            | 0.89~0.94                         | 7.9~51.6   | 0.3~1.7 |
| 14M2N-13 | 11      | 3.5~7.1                            | 0.9~0.94                          | 9.2~55.3   | 0.3~1.8 |



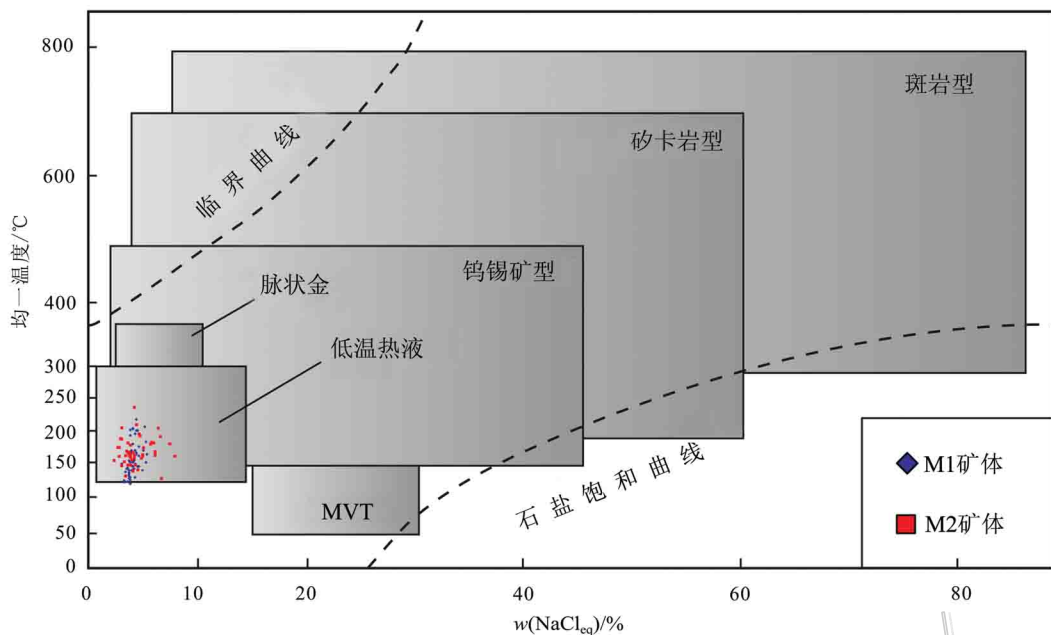


图7 梅岭矿床包裹体均一温度-盐度与不同类型矿床中包裹体的均一温度-盐度对比图(底图据 Wilkinson, 2001)

Fig. 7 Comparison between temperature-salinity of inclusions of the Meiling deposit and that of inclusions in different types of ore deposits (base map after Wilkinson, 2001)

与压力。流体包裹体液相成分分析表明,流体中富含 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ 比值略大于或者小于1,未检测出 $\text{F}^-$ ,因此,认为梅岭铜(金)矿床流体包裹体的 $\text{F}^-/\text{Cl}^-$ 比值较小,这与I型花岗岩类有关的热液矿床矿物包裹体特征具有相似之处,而I型花岗岩的岩浆经常沿张性断裂贯入,岩浆易于在断裂带内流动,因而其起源深度大(莫霍面之下),但就位深度浅(1~3 km)。因此,认为梅岭铜(金)矿床的成矿深度较浅。

#### 4.2 成矿流体性质

流体包裹体液相成分表(表3)中, $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值大于1(其中1个样品的 $\text{Ca}^{2+}$ 未检测出); $\text{Na}^+/\text{K}^+$ 比值均略大于或者小于1; $\text{Mg}^{2+}$ 未检测出,总体呈现出 $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 的状态;阴离子中, $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值略大于或者小于1(其中2个样品检测出 $\text{SO}_4^{2-}$ ), $\text{F}^-$ 未检测出,总体呈现 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ 的状态。综合分析,流体中阳离子以 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 为主, $\text{Ca}^{2+}$ 次之,阴离子以 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主,因此,成矿流体应是一种 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 类型流体。由于铜、金多以氯络合物、硫络合物的形式迁移,因此,该流体体系应具有一定的溶解和搬运成矿物质的能力(Nesbitt, 1988; Gammons et al., 1997)。根据以上分析,成矿流体

基本可以用 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 热液体系来表示。

梅岭铜矿床石英中流体包裹体的类型和显微特征以及显微测温结果表明,梅岭矿床与造山型矿床的标志性低盐度、富 $\text{CO}_2$ 流体包裹体(Goldfarb et al., 2005)以及斑岩型矿床以高温、高盐度为特征(Mernagh et al., 2007),富含多类子晶包裹体和富 $\text{CO}_2$ 的含子晶包裹体(陈衍景等, 2007)有着明显的不同,显示其成矿流体不是变质热液或简单的岩浆热液,其流体性质特征与浅成低温热液一致(Chen et al., 2012)。

梅岭铜锌(金)矿床包裹体的均一温度-盐度与不同类型矿床中包裹体的均一温度-盐度对比图(图7)中显示,温度集中在135~200℃,  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 集中在2%~6%,投点绝大部分落入低温热液矿床类型中,结合以上石英中的流体包裹体岩相学分析、显微测温研究以及群体包裹体成分分析结果表明,梅岭铜(金)矿床的成矿流体性质可能为浅成低温热液流体性质。

#### 4.3 成矿物质来源与演化

Roedder(1979)指出,包裹体液相组分包括 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等离子和离子团,是成矿流体的重要组成部分,液相组分含量的不同对其流体来源及成矿环境有指示意义,特别是

$n(\text{Na}^+)/n(\text{K}^+)$ 、 $n(\text{Ca}^{2+})/n(\text{Mg}^{2+})$ 、 $n(\text{F}^-)/n(\text{Cl}^-)$ 等离子个数比值是流体来源的重要指示标志(王莉娟等, 2009)。Roedder(1984)的研究成果显示, 岩浆热液  $\text{Na}^+/\text{K}^+ < 1$ , 变质热液  $\text{Na}^+/\text{K}^+ \approx 1$ , 而与地下热卤水有关的成矿流体  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  较高, 通常大于 1; 张德会(1992)总结了数百个矿床流体包裹体的  $\text{F}^-/\text{Cl}^-$  比值和  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  比值数据, 显示  $\text{F}^-/\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  比值可以作为判别热液来源的辅助标志, 并认为: ① 与 I 型花岗岩类有关的热液矿床矿物包裹体具有较低的  $\text{F}^-/\text{Cl}^-$  和高的  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  比值, 与 S 型花岗岩类有关的热液矿床具有较高的  $\text{F}^-/\text{Cl}^-$  比值和低的  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  比值; ②  $\text{Na}^+/\text{K}^+ < 2$  和  $\text{F}^-/\text{Cl}^- > 1$  是壳源岩浆流体的特征,  $\text{Na}^+/\text{K}^+ > 10$  和  $\text{F}^-/\text{Cl}^- < 1$  为幔源岩浆流体或变质流体。梅岭铜锌(金)矿床的流体包裹体液相成分分析表明, 流体中富含  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  比值略大于或者小于 1, 未检测出  $\text{F}^-$ , 因此, 认为梅岭铜(金)矿床的流体包裹体的  $\text{F}^-/\text{Cl}^-$  比值较小, 一般认为  $\text{F}^-/\text{Cl}^-$  比值较小时反映其地下热卤水或大气降水成因(卢焕章等, 1990), 梅岭铜锌(金)矿床的  $\text{F}^-/\text{Cl}^-$  比值很小, 可能反映了其地下热卤水或大气水成因, 结合石英包裹体的测温结果表明梅岭矿床的成矿流体可能为大气水成因;  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  比值多数大于 1, 但有 2 个样品小于 1, 表明岩浆水可能参与了成矿作用。因此, 笔者认为梅岭铜锌(金)矿床的成矿流体应为岩浆水及大气水的混合水。

由于不同来源的流体具有不同的氢、氧同位素组成特征(张理刚, 1985), 因此, 可根据热液矿物流体包裹体中水的氢、氧同位素组成来判别成矿热液体系中水的来源(郑永飞等, 2000)。梅岭 II 阶段石英包裹体的氢、氧同位素分析结果显示,  $\delta\text{D}$  值为  $-135.6\text{‰} \sim -117.2\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值为  $-5.75\text{‰} \sim -2.61\text{‰}$ , 通过与 Ohmoto(1986)和 Sheppard(1986)界定的标准岩浆水  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  为  $5.5\text{‰} \sim 9.5\text{‰}$ ,  $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$  为  $-80\text{‰} \sim -40\text{‰}$  相比较可知, 氢同位素  $\delta\text{D}$  值和氧同位素  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值均远低于标准岩浆水的值。由  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}-\delta\text{D}$  关系图解(图 8)可以看出, 梅岭铜锌(金)矿床样品远离雨水线和岩浆水, 指示成矿流体为混合水。

总之, 包裹体成分和氢、氧同位素研究结果均显示梅岭铜锌(金)矿床的成矿流体应为混合水, 可能为岩浆水与大气水的混合水。

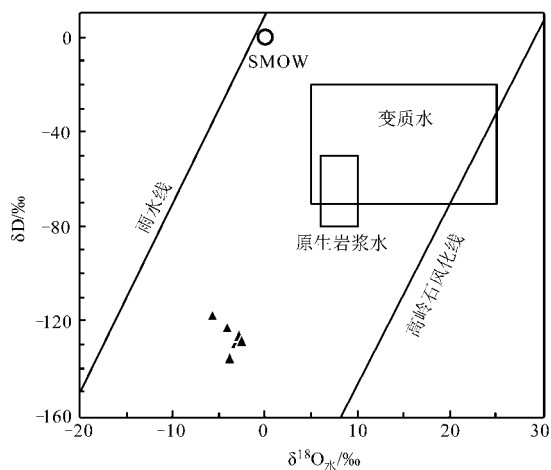


图 8 梅岭矿床成矿流体的  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  图解

(Hedenquist et al., 1994)

Fig. 8  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  diagram of ore-forming fluids in the Meiling deposit (Hedenquist et al., 1994)

#### 4.4 矿床成因初探

卡拉塔格地区发育了复杂的火山-次火山热液成矿系统, 形成了包括早古生代 VMS 型、晚古生代斑岩型以及热液脉型成矿系统(毛启贵等, 2010; 2014; Mao et al., 2014)。早古生代 VMS 型成矿系统, 受早古生代火山机构和同生断裂控制, 形成块状硫化物型铜锌多金属矿, 如红海-黄土坡铜锌矿, 矿化元素组合为  $\text{Cu-Zn-Au-Ag}$  等; 晚古生代斑岩型成矿系统, 成矿与次火山岩侵入有关, 为细脉浸染状矿化, 如玉带铜钼矿床, 矿化元素为  $\text{Cu-Mo-Au}$  等。梅岭-红石等热液脉型成矿系统位于红海 VMS 型矿床北西、玉带斑岩型矿床东南方向, 产于奥陶系大柳沟组火山岩中(图 2), 矿体以脉状-网脉状为特征, 其矿床成因类型尚无定论。高珍权等(2006)通过成矿地质背景对比研究认为其具有大型斑岩型铜矿的成矿潜力; 缪宇等(2007)根据流体包裹体研究认为梅岭铜矿床属于高硫型浅成低温热液矿床。卡拉塔格地区地层由核部向外逐渐变新, 指示背斜构造(图 2), 若 VMS 型矿床的下盘支脉系统在背斜核部倒转, 亦可构成脉状成矿系统。

梅岭铜锌(金)矿床产于一套陆相火山岩-次火山岩中, 矿体呈脉状(图 3), 矿石除脉状、角砾状外(图 4), 还可见梳状构造、晶簇/晶洞状等构造(图 4), 多沿开放裂隙充填, 指示成矿作用发生在近地表环境, 这与 VMS 型矿床的支脉系统(Allen et al.,

2002; Galley et al., 2007; Huston et al., 1999; Naden et al., 2005)截然不同,显然不是红海 VMS 型矿床支脉系统倒转的产物,而且梅岭矿床的成矿元素组合以 Cu-Zn-Au 为主,不同于红海 VMS 型矿床的 Cu-Zn-Au-Ag 组合;围岩蚀变只发育绢云母化、碳酸盐化、青磐岩化等低温蚀变组合(图 4),缺乏高温蚀变组合,这与斑岩型矿床常见钾长石化、黑云母化等高温蚀变矿物组合(Herzig et al., 1993; Kesler et al., 2005; Sillitoe, 1973; 2010; Sinclair, 2007)有着明显区别;梅岭铜矿床的成矿流体以发育中-低温( $117\sim 238^{\circ}\text{C}$ )、中-低盐度( $2.4\%\sim 9.3\%$ )的富液两相包裹体为特征,成矿温度低,成矿深度浅,明显不同于以高温、高盐度为特征的斑岩型矿床(Mernagh et al., 2007),富含多类子晶包裹体和富  $\text{CO}_2$  的含子晶包裹体(陈衍景等, 2007)的成矿流体。上述梅岭铜锌(金)矿床的地质与流体特征均与浅成低温热液型成矿系统(即由酸性的富含挥发分的低于  $300^{\circ}\text{C}$  的含矿流体在温度、压力、化学(天水加入)条件快速变化的情况下,引起温度、挥发分含量以及压力的降低而形成,含矿热液与天水、孔隙水等液体的相互作用明显,围岩蚀变、流体包裹体特征、稳定同位素(氢、氧)都记录了这一过程)(Bethke et al., 2005; Chen et al., 2012; Cooke et al., 2000; Gemmell et al., 2004; Hedenquist et al., 2000; Sillitoe et al., 1996; White et al., 1995)一致,因此,本文认为梅岭矿床的矿床成因类型可能为浅成低温热液型矿床。卡拉塔格地区岩浆岩较为发育,包裹体成分分析中低的  $\text{F}^-/\text{Cl}^-$  比值和较高的  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  比值,表明其与 I 型花岗岩类有关的热液矿床的包裹体相类似(张德会, 1992),因此,推测其深部可能发育有岩浆房,有存在斑岩型铜多金属矿床的可能性,应引起足够的关注。

## 5 结 论

(1) 梅岭铜锌(金)矿床 M1 矿体和 M2 矿体具有相似的流体包裹体特征,主要发育  $\text{H}_2\text{O}$  溶液包裹体,石英流体包裹体具中-低温( $133\sim 214^{\circ}\text{C}$ , 平均值  $164^{\circ}\text{C}$ ;  $117\sim 238^{\circ}\text{C}$ , 平均值  $170^{\circ}\text{C}$ )、中-低盐度( $2.4\%\sim 7.5\%$ , 平均值  $3.9\%$ ;  $1.4\%\sim 9.3\%$ , 平均值  $2.5\%$ )和较低密度( $0.68\sim 0.97\text{ g/cm}^3$ , 平均值  $0.85\text{ g/cm}^3$ ;  $0.8\sim 0.98\text{ g/cm}^3$ , 平均值  $0.91\text{ g/cm}^3$ )的特征,显示成矿压力较低( $34.5\sim 56.8\text{ MPa}$ , 平均值  $43.2\text{ MPa}$ ;  $6.8\sim 60.6\text{ MPa}$ , 平均值  $30.1\text{ MPa}$ ),

成矿深度浅( $1.1\sim 1.9\text{ km}$ , 平均值  $1.4\text{ km}$ ;  $0.2\sim 2.0\text{ km}$ , 平均值  $1.0\text{ km}$ )。研究表明, M1 矿体与 M2 矿体应属同一矿体,只是由于断裂构造以及含矿围岩和容矿空间的差异,造就了梅岭铜(金)矿床 M1 矿体和 M2 矿体的矿化富集程度的差异,这也验证了野外的地质考察结果。

(2) 石英流体包裹体气相成分以  $\text{H}_2\text{O}$  为主,其次为  $\text{CO}_2$ , 并含有少量  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$  等还原性气体;液相成分中,阳离子以  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  为主,其次为  $\text{Ca}^{2+}$ , 阴离子以  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  占主导地位;成矿流体属于  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{NaCl}$  体系。

(3) 梅岭铜锌(金)矿床包裹体成分和氢、氧同位素研究结果均显示矿床的成矿流体应为岩浆水与大气降水的混合水。总之,综合矿区的矿床地质特征、围岩蚀变特征及本文所获得的成矿流体包裹体特征以及氢、氧同位素的研究成果均显示梅岭铜(金)矿床为浅成低温热液型矿床。

(4) 梅岭铜锌(金)矿床成矿流体研究,为矿床成因提供了成矿流体的证据,弥补了前人的研究空白,对该矿床的成因探讨是一种突破,也为该区成矿系统的综合研究提供了新的思路和理论依据。

(5) 前人对该区进行了大量野外地质调查,取得了丰富的研究成果,加之深部可能发育有岩浆房,推测其深部也有可能存在斑岩型铜多金属矿床,应引起足够的关注。

**志 谢** 野外工作中得到新疆维吾尔自治区哈密地区红石矿业公司相关地质工程师的热情帮助,论文完成过程中北京矿产地质研究院的王莉娟研究员给予了很多意见与建议,两位匿名审稿人对本文提出了很多宝贵的意见,在此一并表示感谢。

## References

- Allen R, Weihed P and Team G. 2002. Global comparisons of volcanoclastic massive sulphide districts [A]. In: Blundell D J, Neubauer F and Von Quadt A, eds. The timing and location of major ore deposits in an evolving oroge [C]. Geological Society of London Special Publication, 204: 13-37.
- Bethke P, Rye R, Stoffregen R and Vikre P. 2005. Evolution of the magmatic-hydrothermal acid-sulfate system at Summitville, Colorado: Integration of geological, stable isotope, and fluid inclusion evidence [J]. Chemical Geology, 215: 281-315.
- Brown P and Hagemann S. 1995. MacFlinCor and its application to

- fluids in Archean lode-gold deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(19): 3943-3952.
- Cao F G, Tu Q J, Zhang X M, Ren Y, Li S L and Dong F R. 2006. Preliminary determination of the Early Paleozoic magmatic arc in the Karlik Mountains, East Tianshan, Xinjiang, China evidence from zircon SHRIMP U-Pb dating of granite bodies in the Tashuihe area[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 923-927 (in Chinese with English abstract).
- Chen F W, LI H Q, Chen Y C, Wang D H, Wang J L, Liu D Q, Tang Y L and Zhou R H. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb dating and its geological significance of mineralization in Tuwu-Yandong porphyry copper mine, East Tianshan Mountain[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 256-261 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Ni P, Fan H R, Pirajno F, Lai Y, Su W C and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(09): 2085-2108 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Pirajno F and Wu G. 2012. Epithermal deposits in north Xinjiang, NW China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 101: 889-917.
- Clayton R O, Neil J and Mayeda T. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. *Journal of Geophysical Research*, 77(17): 3057-3067.
- Cooke D and Simmons S. 2000. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits[J]. *Society of Economic Geologists Reviews*, 13: 221-244.
- Fang T H, Qin K Z, Wang S L, Jiang F Z, Gan X P and Zhou Z J. 2002. Elementary analysis of geological background of Kalatage copper and gold deposit[J]. *Mineral Deposits*, 21(Supl.): 380-384 (in Chinese with English abstract).
- Galley A, Hannington M and Jonasson I. 2007. Volcanogenic massive sulphide deposits[A]. In: Goodfellow W D, ed. A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces and exploration methods[C]. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 5: 141-161.
- Gammons C H, Yu Y M and Williams-Jones A E. 1997. The disproportionations of gold(I) chloride complexes at 24 to 200 °C [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(10): 1971-1983.
- Gao Z Q, Fang W X, Hu R Z and Liu J S. 2006. The metallogenic environment of Kalatage porphyry copper (gold) deposit and its prospecting perspective, Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 90-100 (in Chinese with English abstract).
- Gemmell J, Sharpe R, Jonasson I and Herzog P. 2004. Sulfur isotope evidence for magmatic contributions to submarine and subaerial gold mineralization: Conical seamount and the Ladolam gold deposit, Papua New Guinea [J]. *Econ. Geol.*, 99: 1711-1725.
- Goldfarb J, Baker T and Dube B. 2005. Distribution, character and genesis of gold deposits in metamorphic terranes [J]. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume, 407-450.
- Guo H C, Zhong L and Li L Q. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of quartz diorite in the Koumenzi area, Karlik Mountains, East Tianshan, Xinjiang, China, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 928-931 (in Chinese with English abstract).
- Hall D, Sterner S and Bodnar R. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O solution[J]. *Econ. Geol.*, 83(1): 197-202.
- Hedenquist J and Lowenstern J. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Nature*, 370(6490): 519-527.
- Hedenquist J, Arribas A and Gonzalez-Urrien E. 2000. Exploration for epithermal gold deposits[A]. In: Hagemann S G and Brown P E, eds. Gold in 2000: Society of economic geologists[J]. *Reviews in Economic Geology*, 13: 245-277.
- Herzig P, Harmington M, Fouquet Y, Von Stackelberg U and Petersen S. 1993. Gold-rich polymetallic sulfides from the Lau back arc and implications for the geochemistry of gold in sea-floor hydrothermal systems of the southwest Pacific[J]. *Econ. Geol.*, 88: 2182-2209.
- Hou G S, Tang H F, Liu C Q and Wang Y B. 2005. Geochronological and geochemical study Yandong porphyry copper deposits, eastern Tianshan Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1729-1736 (in Chinese with English abstract).
- Huston D L. 1999. Stable isotopes and their significance for understanding the genesis of volcanic-hosted massive sulfide deposits: A review[J]. *Reviews in Economic Geology*, 8: 157-179.
- Kesler S, Campbell I, Smith C, Hall C and Allen C. 2005. Age of the Pueblo Viejo gold-silver deposit and its significance to models for high-sulfidation epithermal mineralization[J]. *Econ. Geol.*, 100: 253-272.
- Li H Q, Chen F W, Lu Y F, Yang H M, Guo J and Mei Y P. 2004. Zircon SHRIMP U-Pb age and strontium isotopes of mineralized granitoids in the Sanchakou copper polymetallic deposit, East Tianshan Mountains[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(2): 191-195 (in Chinese with English abstract).
- Li J T. 2004. Late Neo-Proterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China[J]. *Geological Review*, 50(3): 304-322 (in Chinese with English abstract).
- Li W Q, Wang R, Wang H and Xia B. 2006. Geochemistry and petrogenesis of the Kalatag intrusion in the "Tuha window" geology in China[J]. *Geology in China*, 33(3): 559-565 (in Chinese with English abstract).
- Liu B and Duan G X. 1987. The density and ochoric are formulae for NaCl-H<sub>2</sub>O fluid inclusions (salinity ≤ 25%) and the rapplications[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 7(4): 345-352 (in Chinese with English abstract).
- Lu H Z, Li B L and Wei J X. 1990. Fluid inclusion geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).



- Mao Q G, Fang T H, Wang J B, Wang S L and Wang N. 2010. Geochronology studies of the Early Paleozoic Honghai massivesulfide deposits and its geological significance in Kalatage area, eastern Tianshan Mountain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3017-3026 (in Chinese with English abstract).
- Mao Q G, Wang J B, Xiao W J, Fang T H, Wang N and Yu M J. 2014. The discovery of Low-Carboniferous arc volcanic rocks and its tectonic signifiance at the Kalatage area in the Central Tianshan, Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(10): 1790-1799 (in Chinese with English abstract).
- Mao Q G, Xiao W J, Fang T H, Windley B, Sun M, Ao S J, Zhang J E and Huang X K. 2014. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of Early Permian alkaline magmatism in the eastern Tianshan: Implications for tectonics of the southern Altaids[J]. *Lithos*, 190-191: 37-51.
- Mao Q G, Wang J B, Fang T H, Zhu J J, Fu W W, Yu M J and Huang X K. 2015. Lead and sulfur isotope studies of sulfides from Honghai VMS-type deposit in Kalatage ore belt of eastern Tianshan Mountains[J]. *Mineral Deposits*, 34(4): 730-744 (in Chinese with English abstract).
- Mernagh T, Bastrakov E and Zaw K. 2007. Comparison of fluid inclusion data and mineralization processes for Australian orogenic gold and intrusion-related gold systems[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(1): 21-32.
- Miao Y, Qin K Z, Xu Y X, Fang T H, Ding K S and Xu X W. 2007. Geological and fluid inclusion characteristics of Meiling Cu-Au deposit in Kalatage ore belt, eastern Xinjiang, in comparison with typical Zijinshan-style HS-epithermal deposit[J]. *Mineral Deposits*, 26(1): 79-88 (in Chinese with English abstract).
- Naden J, Kilias S and Darbyshire D. 2005. Active geothermal systems with entrained seawater as modern analogs for transitional volcanic-hosted massive sulfide and continental magmato-hydrothermal mineralization: The example of Milos Island, Greece[J]. *Geology*, 33: 541-544.
- Nesbitt B E. 1988. The gold deposit continuum: A genetic model for lode gold mineralization in the continental crust[J]. *Geology*, 16(11): 1044-1048.
- Ohmoto H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. *Reviews in Mineralogy*, 16: 491-559.
- Qin K Z, Fang T H, Wang S L, Zhu B Q, Feng Y M, Yu H F and Xiu Q Y. 2002. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in eastern Tianshan Mountains, NW-China [J]. *Xinjiang Geology*, 20(4): 302-308 (in Chinese with English abstract).
- Roedder E. 1979. In physics and chemistry of the earth [M]. Oxford: Pergamas Press. 9-35.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions[M]. Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy*.
- Rui Z Y, Wang L S, Wang Y T and Liu Y B. 2002. Discussion on metallogenic epoch of Tuwu and Yandong porphyry copper deposits in eastern Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 21(1): 16-21 (in Chinese with English abstract).
- Shao J L. 1988. Prospecting mineralogy of gold ore[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 38-45 (in Chinese with English abstract).
- Sheppard S. 1986. Characterization and isotopic variations in natural waters[J]. *Reviews in Mineralogy*, 16: 165-183.
- Sillitoe R. 1973. The tops and bottoms of porphyry copper deposits[J]. *Econ. Geol.*, 68: 700-815.
- Sillitoe R, Hannington M and Thompson J. 1996. High sulfidation deposits in the volcanogenic massive sulfide environment[J]. *Econ. Geol.*, 91: 204-212.
- Sillitoe R. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Econ. Geol.*, 105: 3-41.
- Sinclair W. 2007. Porphyry deposits[A]. In: Goodfellow W D, ed. A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods[C]. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 5: 223-243.
- Song B, Li J Y, Li W Q, Wang K Z and Wang Y. 2002. SHRIMP dating of zircons from Dananhu and Kezirkalasayi granitoid batholith in southern margin of Tuha Basin and their geological implication[J]. *Xinjiang Geology*, 20(4): 342-345 (in Chinese with English abstract).
- Sun G H, Li J Y, Gao L M and Yang T N. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb age of a dioritic pluton in the Harlik mountain, eastern Xinjiang, and its tectonic implication[J]. *Geological Review*, 51(4): 463-469.
- Sun G H, Li J Y, Zhu Z X, Li Y P and Yang Z Q. 2007. Zircons SHRIMP U-Pb dating of gneissoid-biotitic granite in Harlik mountains, eastern of Xinjiang and it's geological implications[J]. *Xinjiang Geology*, 25(1): 4-10 (in Chinese with English abstract).
- Tang J H, Gu L X, Zheng Y C, Fang T H, Zhang Z Y, Gao J H, Wang F T, Wang C S and Zhang G H. 2006. Petrology, geochemistry and genesis of the Na-rich volcanic rocks of the Kalatage area, eastern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1150-1166 (in Chinese with English abstract).
- Wan D F, Fan T Y and Tian S H. 2005. The chromium analytical technique for hydrogen isotopes[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(Supl.): 35-38 (in Chinese with English abstract).
- Wang J B, Wang Y W and He Z J. 2006. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the East Tianshan Mountains, NW China[J]. *Geology in China*, 33(3): 461-469 (in Chinese with English abstract).
- Wang L J, Peng Z G, Zhu X Y, Deng J N, Wang Y W and Zhu H P. 2009. Source and evolution of ore fluid of the Xitieshan sedimentary exhalative lead zinc system, Qinghai Province: Evidence from fluid inclusion and isotope geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3007-3015 (in Chinese with English abstract).

- White N C and Hedenquist G W. 1995. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration[J]. SEG newsletter, 23: 9-13.
- Wilkinson J. 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits[J]. Lithos, 55(1-4): 229-272.
- Wu H, Li H Q, Chen F W, Lu Y F, Deng G, Mei Y P and Ji H G. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of pagiogranite porphyry in the Chihu molybdenum-copper district, Hami, East Tianshan[J]. Geological Bulletin of China, 25(5): 549-552 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, Sun S and Li J L. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implication for the continental growth of central Asia[J]. American Journal of Science, 304: 370-395.
- Xu Y X, Qin K Z, Ding K S, Miao Y, Fang T H, Xu X W and Sun H. 2006. Krausite, rhomboclase and parabutlerite found for the first time in the Hongshan high-S epithermal Cu-Au deposit, Xinjiang, and their significance[J]. Geology in China, 33(3): 149-156 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y X, Qin K Z, Ding K S, Miao Y, Fang T H and Xu X W. 2007. Cuprociopite and ferriciopite found for first time in oxidized zone of Hongshan HS-epithermal Cu-Au deposit, East Tianshan, and their mineralogical characteristics[J]. Mineral Deposits, 26(1): 58-69 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y X, Qin K Z, Ding K S, Li J X, Miao Y, Fang T H, Xu X W, Li D M and Luo X Q. 2008. Geochronology evidence of Mesozoic metallogenesis and Cenozoic oxidation at Hongshan HS-epithermal Cu-Au deposit, Karatg region, eastern Tianshan and its tectonic and paleoclimatic significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(10): 2371-2383 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D H. 1992. Aqueous phase composition characteristic of mineral fluid inclusions and its significance in ore genesis[J]. Earth Science, 17(6): 677-688 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D H, Xu J H, Yu X Q, Li J K, Mao S D, Wang K Q and Li Y Q. 2011. The diagenetic and metallogenic depth: Main constraints and the estimation methods[J]. Geological Bulletin of China, 30(1): 112-125 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L G. 1985. The application of the stable isotope to geology, the hydrothermal mineralization of metal activation and its prospecting[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Publishing House. 1-267 (in Chinese).
- Zhang L C, Qin K Z, Ying J F and Xia B and Shu J S. 2004. The relationship between ore-forming processes and adakitic rock in Tuwu-Yandong porphyry copper metallogenic belt, eastern Tianshan mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 243-252 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Wan B, Li W Q and Tang H F. 2006. Geochemistry and tectonic setting of copper-bearing phyrries on the southern margin of Tuha Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 225-235 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F and Chen J F. 2000. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press. 1-316 (in Chinese).
- Zhu H P and Wang L J. 2001. Determining gaseous composition of fluid inclusions with quadrupole mass spectrometer[J]. Science in China (Series D), 31(7): 586-590 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 曹福根, 涂其军, 张晓梅, 任燕, 李嵩龄, 董富荣. 2006. 哈尔里克山早古生代岩浆弧的初步确定——来自塔水河一带花岗质岩体锆石 SHRIMP U-Pb 测年的证据[J]. 地质通报, 25(8): 923-927.
- 陈富文, 李华芹, 陈毓川, 王登红, 王金良, 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 2005. 东天山土屋-延东斑岩铜矿田成岩时代精确测定及其地质意义[J]. 地质学报, 79(2): 256-261.
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. 岩石学报, 23(09): 2085-2108.
- 方同辉, 秦克章, 王书来, 姜福芝, 甘先平, 周志坚. 2002. 浅析卡拉塔格铜金矿成矿地质背景[J]. 矿床地质, 21(增刊): 380-384.
- 高珍权, 方维董, 胡瑞忠, 刘继顺. 2006. 新疆东天山卡拉塔格斑岩型铜(金)矿成矿地质背景与找矿评价[J]. 地质学报, 80(1): 90-100.
- 郭华春, 钟莉, 李丽群. 2006. 哈尔里克山口门子地区石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义[J]. 地质通报, 25(8): 928-931.
- 侯广顺, 唐红峰, 刘从强, 王彦斌. 2005. 东天山土屋-延东斑岩铜矿围岩的同位素年代和地球化学研究[J]. 岩石学报, 21(6): 1729-1736.
- 李华芹, 陈富文, 路远发, 杨红梅, 郭敬, 梅玉萍. 2004. 东天山三岔口铜矿区矿化岩体 SHRIMP U-Pb 年代学及锆同位素地球化学特征研究[J]. 地球学报, 25(2): 191-195.
- 李锦轶. 2004. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变[J]. 地质论评, 50(3): 304-322.
- 李文钊, 王冉, 王核, 夏斌. 2006. “吐哈天窗”卡拉塔格岩体的地球化学和岩石成因[J]. 中国地质, 33(3): 559-565.
- 刘斌, 段光贤. 1987. NaCl-H<sub>2</sub>O 溶液包裹体的密度式和等容式及其应用[J]. 矿物学报, 7(4): 345-352.
- 卢焕章, 李乘伦, 魏家秀. 1990. 包裹体地球化学[M]. 北京: 地质出版社. 1-450.
- 毛启贵, 方同辉, 王京彬, 王书来, 王宁. 2010. 东天山卡拉塔格早古生代红海块状硫化物矿床精确定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 25(10): 3017-3026.
- 毛启贵, 王京彬, 肖文交, 方同辉, 王宁, 于明杰. 2014. 东天山中天山构造带早石炭世岛弧火山岩的厘定及其地质意义[J]. 地质学报, 88: 1790-1799.

- 毛启贵,王京彬,方同辉,朱江建,付王伟,于明杰,黄行凯. 2015. 东天山卡拉塔格矿带红海 VMS 型矿床 S、Pb 同位素地球化学研究[J]. 矿床地质, 34(4): 730-744.
- 缪宇,秦克章,许英霞,方同辉,丁奎首,徐兴旺. 2007. 东疆卡拉塔格梅岭铜(金)矿床地质和流体包裹体特征及其与紫金山式铜金矿床的对比[J]. 矿床地质, 26(1): 79-88.
- 秦克章,方同辉,王书来,朱宝清,冯益民,于海峰,修群业. 2002. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究[J]. 新疆地质, 20(4): 302-308.
- 芮宗瑶,王龙生,王义天,刘玉琳. 2002. 东天山土屋和延东斑岩铜矿床时代讨论[J]. 矿床地质, 21(1): 16-21.
- 邵洁涟. 1988. 金矿找矿矿物学[M]. 武汉:中国地质大学出版社. 38-45.
- 宋彪,李锦轶,李文铅,王克卓,王瑜. 2002. 吐哈盆地南缘克孜尔卡拉萨依和大南湖花岗质岩基锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 新疆地质, 20(4): 342-345.
- 孙桂华,李锦轶,高立明,杨天南. 2005. 新疆东部哈尔里克山闪长岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质论评, 51(4): 463-469.
- 孙桂华,李锦轶,朱志新,李亚萍,杨之清. 2007. 新疆东部哈尔里克山片麻状黑云母花岗岩锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及其地质意义[J]. 新疆地质, 25(1): 4-10.
- 唐俊华,顾连兴,郑远川,方同辉,张遵忠,高军辉,王福田,汪传胜,张光辉. 2006. 东天山卡拉塔格钠质火山岩岩石学、地球化学及成因[J]. 岩石学报, 22(5): 1150-1166.
- 万德芳,樊天义,田世洪. 2005. 用金属铬法分析微量水和有机质氢同位素组成[J]. 地球学报, 26(增刊): 35-38.
- 王京彬,王玉往,何志军. 2006. 东天山大地构造演化的成矿示踪[J]. 中国地质, 33(3): 461-469.
- 王莉娟,彭志刚,祝新友,邓吉牛,王玉往,朱和平. 2009. 青海省锡铁山 Sedex 型铅锌矿床成矿流体来源及演化:流体包裹体及同位素地球化学证据[J]. 岩石学报, 25(11): 3007-3015.
- 吴华,李华芹,陈富文,路运发,邓岗,梅玉萍,姬后贵. 2005. 东天山哈密地区赤湖铜矿矿区斜长花岗斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 25(5): 549-552.
- 许英霞,秦克章,丁奎首,缪宇,方同辉,徐兴旺,孙赫. 2006. 钾铁矾、板铁矾、副基铁矾三种硫酸盐矿物在新疆哈密卡拉塔格红山 Cu-Au 矿床的首次发现及其成因特征[J]. 中国地质, 33(3): 149-156.
- 许英霞,秦克章,丁奎首,缪宇,方同辉,徐兴旺. 2007. 东疆红山矿床氧化带中铜叶绿矾和高铁叶绿矾的首次发现及其矿物学特征[J]. 矿床地质, 26(1): 58-69.
- 许英霞,秦克章,丁奎首,李金祥,缪宇,方同辉,徐兴旺,李大明,罗修泉. 2008. 东天山红山高硫型浅成低温铜金矿床:中生代成矿域新生代氧化的 K-Ar、Ar-Ar 年代学证据及其古构造和古气候意义[J]. 岩石学报, 24(10): 2371-2383.
- 张德会. 1992. 矿物包裹体液相成分特征及其矿床成因意义[J]. 地球科学, 17(6): 677-688.
- 张德会,徐九华,余心起,李健康,毛世德,王科强,李泳泉. 2011. 成岩成矿深度:主要影响因素与压力估算方法[J]. 地质通报, 30(1): 112-125.
- 张理刚. 1985. 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. 1-267.
- 张连昌,秦克章,英基丰,等. 2004. 东天山土屋-延东斑岩铜矿带埃达克质岩及其成矿作用的关系[J]. 岩石学报, 20(2): 243-252.
- 张连昌,万博,李文铅,唐红峰. 2006. 新疆吐哈盆地南缘含矿斑岩的地球化学特征及构造环境[J]. 岩石学报, 22(1): 225-235.
- 郑永飞,陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社. 1-193.
- 朱和平,王莉娟. 2001. 四极质谱测定流体包裹体中的气相成分[J]. 中国科学(D 辑), 31(7): 586-590.