

塔里木陆块西北缘伽师铜矿成矿流体特征与成矿作用

王 伟^{1,2}, 李文渊^{1,2}, 唐小东³, 熊中乙², 高满新², 李天虎², 宿晓虹², 郭周平²,
孟 勇², 全守村², 陈传庆³

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 3. 中国冶金地质勘查工程总局新疆地质勘查院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要: 伽师铜矿是柯坪盆地砂岩型铜矿的典型代表, 多位学者曾对其成因进行研究, 但均缺乏详细地球化学证据。本次研究认为该矿床成矿期分为成岩成矿期与改造成矿期, 以成岩成矿期为主。本文通过对伽师铜矿不同成矿期包裹体显微测温, 成分分析以及氢、氧、碳、硫同位素的研究, 探讨了该矿床成矿流体形成演化与成矿作用的关系。结果表明, 该矿床成矿流体成岩期均一温度为 131 ~ 206℃, 盐度 0.35% ~ 9.86% (NaCl_{eq}, 质量分数, 下同), 流体密度 0.90 ~ 0.99 g/cm³, 流体压力为 227 ~ 464 MPa; 改造期均一温度为 131 ~ 285℃, 盐度 0.53% ~ 9.34%, 流体密度 0.78 ~ 1.00 g/cm³, 流体压力为 231 ~ 448 MPa, 总体表现为中低温、中压、中低盐度、中等密度特征, 具有典型地下热卤水特点。其 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围为 -34.5‰ ~ -22.7‰, 表明该矿床的硫主要源自硫酸盐细菌还原和有机质还原; 成岩期包裹体水的 δD 值为 -105.4‰ ~ -79.2‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 -3.13‰ ~ 0.87‰, 改造期 δD 值为 -108.5‰ ~ -81.3‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 -4.21‰ ~ 4.04‰, 表明成矿流体为大气降水、盆地卤水二者混合来源, 并有有机水加入; 其成岩期 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -28.4‰ ~ -24.2‰, 改造期 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -28.5‰ ~ -23.0‰, 与自然界有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 的负值范围特征吻合, 激光拉曼探针成分分析显示该矿床成矿流体成岩期、改造期成分主要为 CH_4 、 H_2S 、 H_2O 等, 指示油田卤水中有机质参与了矿床成岩期、改造期成矿作用过程, 在伽师铜矿成矿过程中起重要还原作用。综合分析认为, 有机质与伽师铜矿成矿作用关系密切, 该矿床是油田卤水参与成矿作用的沉积-改造成因砂岩型铜矿。

关键词: 塔里木陆块; 伽师; 砂岩型铜矿; 成矿流体; 成矿作用

中图分类号: P618.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)04-0605-16

Ore-forming fluid features and mineralization of the Jiashi copper deposit in northwestern Tarim Block

WANG Wei^{1,2}, LI Wen-yuan^{1,2}, TANG Xiao-dong³, XIONG Zhong-yi², GAO Man-xin², LI Tian-hu²,
SU Xiao-hong², GUO Zhou-ping², MENG Yong², QUAN Shou-cun² and CHEN Chuan-qing³

(1. Faculty of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant ore Deposits, MLR, Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, China; 3. Xinjiang Institute of China Geological Exploration and Engineering Bureau, Urumqi 830000, China)

Abstract: The Jiashi copper deposit is a typical representative of sandstone-type copper deposits in the Keping basin. Many geologists have studied its genesis, but have no detailed geochemical evidence. According to research

收稿日期: 2017-08-24; 接受日期: 2018-05-23

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160015, DD20160009, 12120113043700)

作者简介: 王 伟 (1979-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事矿产地质调查与区域成矿规律研究, E-mail: xawwei_2004@sina.com; 通讯作者: 李文渊 (1962-), 男, 博士, 研究员, 从事矿床学及区域成矿研究, E-mail: xaliwenyuan@126.com。

findings of this paper, the metallogenic period of the deposit can be divided into diagenetic metallogenic period and reformation metallogenic period, with the former being the main stage. In this paper, the relationship between the ore-forming fluids evolution and mineralization was investigated by means of microthermometry, composition analysis, hydrogen, oxygen, and carbon and sulfur isotopes of fluid inclusions in the two metallogenic periods of the deposit. According to the results obtained, the ore-forming fluids in the diagenetic period had the homogeneous temperature $131 \sim 206^{\circ}\text{C}$, salinity $0.35\% \sim 9.86\%$, density $0.90 \sim 0.99 \text{ g/cm}^3$, and pressure $227 \sim 464 \text{ MPa}$; in the reformation period, the homogeneous temperature was $131 \sim 285^{\circ}\text{C}$, salinity was $0.53\% \sim 9.34\%$, density was $0.78 \sim 1.00 \text{ g/cm}^3$, and pressure was $231 \sim 448 \text{ MPa}$. The ore-forming fluid was of medium low-temperature, medium-pressure, low-salinity and medium density type, and it had typical characteristics of underground hot brine. The $\delta^{34}\text{S}$ values range from -34.5‰ to -22.7‰ , indicating that the sulfur of the deposit was mainly derived from sulfate bacteria reduction and organic matter reduction. The δD values of inclusions of diagenetic period are $-105.4\text{‰} \sim -79.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ are $-3.13\text{‰} \sim 0.87\text{‰}$; in the reformation period the δD values are $-108.5\text{‰} \sim -81.3\text{‰}$, and $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ are $-4.21\text{‰} \sim 4.04\text{‰}$, indicating that the ore-forming fluid was the mixed source of atmospheric precipitation and basin brine, with the addition of organic water. The $\delta^{13}\text{C}$ values at the diagenetic stage range from -28.4‰ to -24.2‰ , and during the reformation period the values range from -28.5‰ to -23.0‰ , in agreement with the negative range characteristics of natural organic carbon $\delta^{13}\text{C}$. Laser Raman probe composition analysis shows that the main components of the ore-forming fluid of the deposit during the diagenetic period and reformation period were mainly CH_4 , H_2S and H_2O . It is shown that the organic matter in the oilfield brine was involved in the metallogenic process during the diagenetic period and the reformation period, and played an important role of reduction in the ore-forming process of the Jiashi copper deposit. This study shows that organic matter was closely related to the mineralization of the Jiashi copper deposit, which was a sedimentation-reformation type sandstone copper deposit in which the oilfield brine took part in the mineralization.

Key words: Tarim block; Jiashi; sandstone copper deposit; ore-forming fluid; mineralization

Fund support: Project of China Geological Survey(DD20160015, DD20160009, 12120113043700)

塔里木陆块西北缘新生代砂岩型铜矿成带产出,位于该矿带的柯坪前陆盆地中已相继发现有通古孜阿格孜、大山口、伽师、西克尔、1322 公里、西克尔镇北、喀什噶尔北、土鲁库木希等砂岩型铜矿床(点)(图1)(年武强等, 2007; 张振亮等, 2014),形成了南疆地区重要的资源勘查基地,其中的伽师铜矿已达到中型规模,是柯坪盆地砂岩型铜矿的代表性矿床。

伽师铜矿成矿潜力较大,越来越受到研究者的关注(年武强等, 2007; 王思程等, 2011; 张江, 2011; 唐小东等, 2014; 王泽利等, 2015; 丛培章等, 2016),对其成因提出沉积-改造型(年武强等, 2007)、沉积层控型(张江, 2011; 张振亮等, 2014; 丛培章等, 2016)等观点。总体来说,无论提出的何种成因观点或成因模式,砂岩型铜矿成矿过程中,对矿质从形成到最终成矿都和流体参与密切相关这一基本事实均有共识(冉崇英等, 1993; 肖荣阁等, 1994; 谭凯旋等, 1998, 1999; 陈根文等,

2002; 年武强等, 2007; 郭远生等, 2008; 王思程等, 2011; 张江, 2011; 王泽利等, 2015; 吴海枝等, 2016)。但研究者对伽师铜矿成矿流体的来源、成分、成矿物理-化学条件、成矿流体形成演化与成矿作用过程等未做深入研究,提出的矿床成因观点缺少详细的地球化学证据。此外,有机质在沉积岩容矿的沉积型矿床成矿中起到重要作用,已受到诸多研究者的共同关注(杨蔚华等, 1983; 涂光炽, 1984, 1988; 冉崇英等, 1993; 肖荣阁等, 1993; 郭远生等, 2008),前人对伽师铜矿的研究中,虽有学者提出相关认识(张江, 2011; 王泽利等, 2015; 丛培章等, 2016),但对有机质与成矿作用关系的研究较为薄弱,也缺乏相应地球化学证据。

鉴于以上现状,本文对伽师砂岩型铜矿床不同成矿期成矿流体特征进行系统研究,旨在对该矿床成矿流体来源、成分、成矿物理-化学条件、有机质对成矿作用关系进行探讨,提出其成因认识,为柯坪盆地砂岩型铜矿成矿作用与找矿提供新的信息。

1 区域地质背景

伽师铜矿床位于喀什市伽师县西北方向 35 km 处,西南距喀什市约 130 km。大地构造位置位于塔

里木陆块柯坪古生代前陆盆地南西部柯坪塔格背斜南翼(张江, 2011), 其北以哈拉峻-阿合奇断裂为界, 与南天山冲断褶皱带毗邻, 其南以环形断裂为界, 与塔里木中央地块接壤(赵祖应等, 2003; 年武强, 2007; 王思程等, 2011; 张江, 2011)(图 1)。

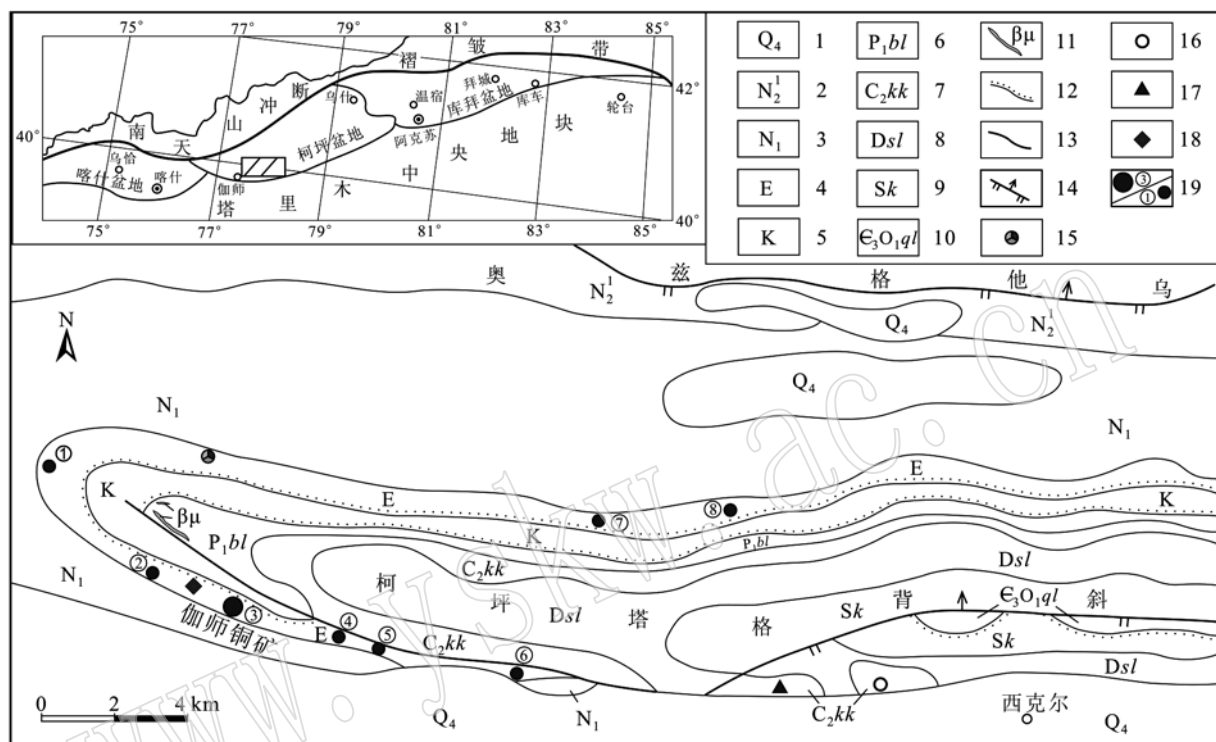


图 1 伽师铜矿区域地质矿产略图(据年武强等, 2007 修改)

Fig. 1 Regional geological map of the Jiashi copper deposit(modified after Nian Wuqiang et al., 2007)

1—第四系冲洪积、冲积、冰积; 2—新近系褐红、灰色泥岩、砂岩及砾岩; 3—新近系褐红色砂岩、砾岩、粉砂岩、泥岩; 4—古近系灰岩、砂岩、泥岩、石膏、砾岩; 5—白垩系砂岩、粘土岩夹泥灰岩及凝灰岩; 6—下二叠统别良金群粉砂岩、泥岩、灰岩、砂岩; 7—上石炭统康克林群灰岩、白云岩夹砂岩、泥岩, 底部夹砾岩; 8—泥盆系沙拉依姆群砖红色夹绿色砂岩、粉砂岩、泥岩; 9—志留系柯坪塔格群紫红色、灰绿色砂岩、粉砂岩、泥岩; 10—寒武-奥陶系秋里塔格群白云岩、灰岩, 富含燧石条带及结核; 11—辉绿岩脉(枝); 12—平行不整合界线; 13—断层; 14—逆断层; 15—铜铅锌矿; 16—铜矿; 17—硫矿; 18—石膏矿; 19—砂岩型铜矿床(点): ①—通古孜阿格孜铜矿点; ②—一大山口铜矿点; ③—伽师铜矿床; ④—西克尔铜矿点; ⑤—1322 公里铜矿点; ⑥—西克尔镇北铜矿点; ⑦—喀什噶尔北铜矿点; ⑧—土鲁库木希铜矿点

1—alluvium, glacial debris of Quaternary; 2—maroon, gray mudstone, sandstone, and conglomerate of Neogene; 3—maroon, gray sandstone, conglomerate, siltstone and mudstone of Neogene; 4—limestone, sandstone, mudstone, gypsum and conglomerate of Paleogene; 5—sandstone, claystone, marlite, tuffaceous rocks of Cretaceous; 6—siltstone, mudstone, limestone and sandstone of Bieliangjin Group in Lower Permian; 7—limestone, dolomite, sandstone and conglomerate of Kangkelin Group in Upper Carboniferous; 8—brick-red, green sandstone, siltstone and mudstone of Shalayimu Group in Devonian; 9—purplish red, greyish-green sandstone, siltstone and mudstone of Kepingtage Group in Silurian; 10—dolomite, limestone, flint band and concretion of Qiulitage Group in Cambrian-Ordovician; 11—dolerite dyke; 12—parallel unconformity; 13—fault; 14—reversed fault; 15—copper-lead-zinc deposit; 16—copper deposit; 17—sulfur deposit; 18—gypsum deposit; 19—sandstone copper deposit or ore spot: ① Tongguziagezi; ② Dashankou; ③ Jiashi; ④ Xikeer; ⑤ 1322 Miles; ⑥ North of Xikeer Town; ⑦ North of Kashigaer; ⑧ Tulukumuxi

区域断裂以奥兹格他乌、柯坪塔格等北倾断裂为主(图 1), 总体呈近东西走向, 从地表到深部, 具有上陡下缓的铲式特征, 北西走向断裂相对不发育,

切割了东西向断裂(王思程等, 2011; 王泽利等, 2015)。

柯坪塔格背斜轴向近东西, 宽约 2 ~ 15 km, 并常

向南倒转,为一极不对称的背斜。北翼倾角 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$,南翼倾角 $70^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 。背斜核部轴线波状起伏,起伏角通常不超过 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。柯坪塔格背斜核部由寒武-奥陶系组成,两翼分别由泥盆系-新近系组成,缺失三叠系和侏罗系(图1),寒武系为一套灰白色碳酸盐岩建造,奥陶系为一套碳酸盐岩-细碎屑岩建造,泥盆系为一套磨拉石-细碎屑岩建造,志留系为一套碎屑岩建造,石炭系为一套碳酸盐岩建造,二叠系为一套碳酸盐岩-细碎屑岩建造,白垩系为一套碎屑岩夹火山碎屑岩建造,古近系为砖红色碎屑岩夹膏岩层,其底部见有少量砾岩,为区域砂岩型铜矿主要赋矿层位,新近系为一套细碎屑岩建造。由于柯坪塔格走向断层的破坏,使南翼的部分地层变窄和缺失。背斜南翼古近系地层中产出有通古孜阿格孜、大山口、伽师、西克尔等一系列砂岩型矿床(点),通过近年的工作,背斜北翼也相继发现喀什噶尔北、

土鲁库木希等砂岩型铜矿点,此外,区域石炭系-古近系内还产出有铜铅锌、硫、石膏等矿(化)点(图1)。油气研究与勘查工作在柯坪盆地内发现大量油苗、沥青砂分布,寒武系-奥陶系、石炭系-二叠系是区域优质烃源岩(吕修祥等,1996,2014)。

区域岩浆活动不发育,在西侧二叠系内出露少量辉绿岩,主要呈岩脉、岩枝产出(年武强等,2007;王思程等,2011),其中见有褐铁矿化、绿泥石化。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

伽师铜矿床位于柯坪塔格背斜南翼及倾没端(图1),为单斜构造,地层倾角较陡,倾角 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$,深部变陡直立甚至倒转。区内主要出露石炭系-第四系,缺失三叠系-侏罗系,总体呈近北西向展布(图2)。

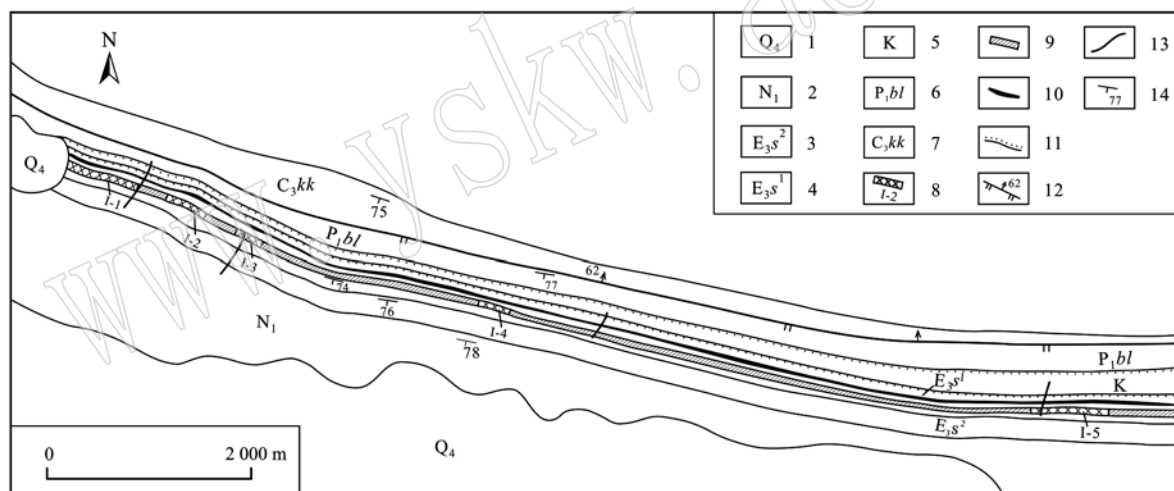


图2 伽师铜矿床地质图(据刘秀德等,2011^①修改)

Fig. 2 Geological map of the Jiashi copper ore deposit(modified after Liu Xiude *et al.*, 2011^①)

- 1—第四系; 2—新近系; 3—古近系苏维依组上段; 4—古近系苏维依组下段; 5—白垩系; 6—下二叠统别良金群; 7—上石炭统康克林群;
8—铜矿体及编号; 9—含矿层; 10—石膏层; 11—平行不整合界线; 12—逆断层及产状; 13—断层; 14—产状
1—Quaternary; 2—Neogene; 3—Upper Suweiyi Formation of Neogene; 4—Lower Suweiyi Formation of Paleogene; 5—Cretaceous; 6—Bieliangjin Group in Lower Permian; 7—Bieliangjin Group in Lower Permian; 8—orebody and its serial number; 9—ore-bearing layer; 10—gypsum layer; 11—parallel unconformity; 12—reversed fault and its attitude; 13—fault; 14—attitude

上石炭统康克林群(C_3kk)广泛分布于矿区北部,岩性主要为厚层状生物灰岩、灰黑色灰岩;下二叠统别良金群(P_1bl)主要分布于矿区中北部,岩性为生物灰岩夹泥岩;白垩系(K)与下伏别良金群为平行不整合接触,主要为一套紫红色粉砂岩。

古近系苏维依组分布于矿区中部,可分为上下两段:下段(E_3s^1)主要为一套砖红色碎屑岩及蒸发岩沉积,为矿区主要含矿段,岩性为砖红色粉砂质泥岩、泥岩夹薄层浅灰白色泥质石膏岩、巨厚层浅灰白色石膏岩、灰绿色含岩屑钙质细砂岩,顶部为砖红色

① 刘秀德,邹存海,何英,等. 2011. 新疆伽师县伽师铜矿资源储量核实报告.

中厚层状泥岩与浅灰绿色砂岩互层。位于下段上部的灰绿色含岩屑钙质细砂岩为铜矿主要赋矿岩性层(图3);上段(E_3s^2)为浅灰绿色粉砂岩与砖红色泥岩互层,薄-中厚层状,在该层中可见到一些硬石膏薄层。

新近系主要分布于矿区南部,岩性为薄-中厚层状褐红色泥质粉砂岩、中厚层状土褐色粉砂质泥岩、

杂色粉砂岩,顶部见少量细脉状石膏,总体风化强烈,多风化成粉末。

第四系分布于矿区的西南部,主要沿沟谷分布,由坡积及冲积物组成。

区内除北部发育一条近北西走向的逆断层外,次级走滑断裂、顺层走滑断裂系统发育,以北东走向为主,北西走向次之,但总体对矿体连续性影响

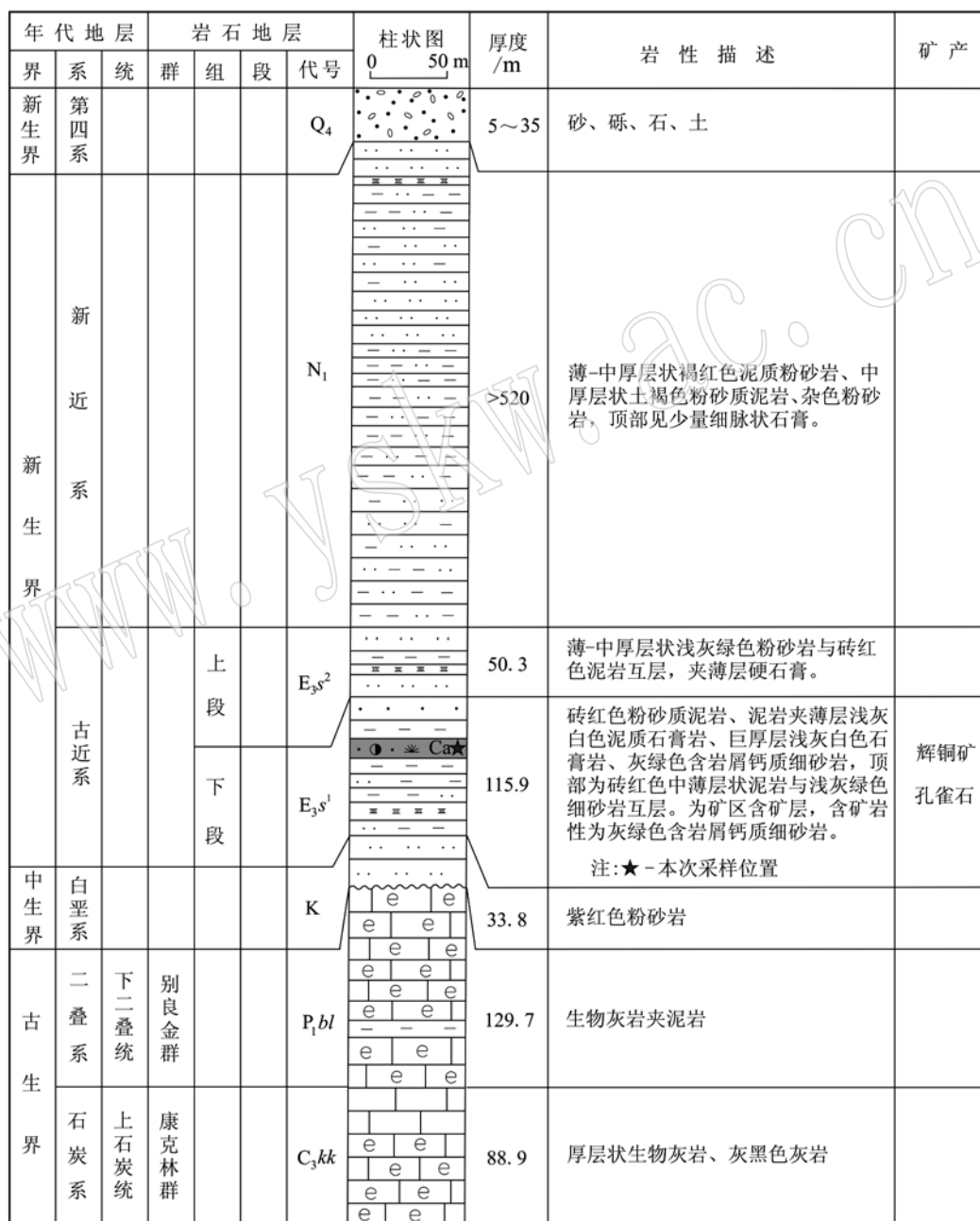


图3 伽师砂岩铜矿区地层柱状图(据刘秀德等,2011^①修改)

Fig. 3 Stratigraphic column of the Jiashi copper deposit(modified after Liu Xiude *et al.*, 2011^①)

① 刘秀德,邹存海,何英,等. 2011. 新疆伽师县伽师铜矿资源储量核实报告.

不大(王泽利等, 2015)。如 I-1 矿体 1 092 m 中段, 在近 600 m 范围内共有 10 余条小型正断层, 倾向 $120^{\circ} \sim 145^{\circ}$, 倾角 $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$, 视水平断距 0.5 ~ 5 m; 在穿脉 28 ~ 29 之间有两条小断层, 二者相距仅 1.6 m, 倾向 125° 左右, 倾角分别为 67° 与 75° , 但二者的视水平断距达 18 m。这组北东走向小断层对矿体的完整性有一定的破坏作用。断裂系统应形成于南天山向南逆冲推覆过程, 断层破碎带及节理中多充填含硫化物方解石脉及网脉状赤铜矿、辉铜矿(王泽利等, 2015)。

矿区内未见岩浆岩。

2.2 矿体

铜矿体主要赋存于古近系苏维依组下段上部 (E_3s^1) 灰绿色含岩屑钙质细砂岩中(图 3), 局部赋存于中粗粒砂岩之中, 含矿层总体走向近北西向, 地表断续延伸约 9 km, 宽 4 ~ 7 m, 共圈定 5 个矿体, 编号分别为 I-1 ~ I-5, 矿体主要呈层状、似层状, 矿体长 140 ~ 700 m(图 2), 厚 0.74 ~ 9.57 m, 平均厚度 3.17 m, 倾向 $193^{\circ} \sim 203^{\circ}$, 倾角 $73^{\circ} \sim 85^{\circ}$ (年武强等, 2007; 王思程等, 2011; 张江, 2011; 丛培章等, 2016), 矿体顶板围岩为砖红色厚层状含细砂-粉砂泥岩, 底板围岩为紫红色中厚层状粉砂质泥岩, 其下为在矿区延伸稳定的厚 2.5 ~ 3.3 m 的巨厚层石膏岩, 可作为找矿标志层, 矿体与顶底板围岩产状相同。部分矿体沿断层、层间滑动断裂和节理裂隙呈脉状产出, 深部还可见到矿体局部倒转(年武强等, 2007; 王泽利等, 2015)。矿体铜平均品位 0.74% ~ 1.70%, 矿化较均匀, 无大的变化, 伴生元素中仅银含量较高(张江, 2011), 其他伴生元素均达不到综合利用价值。

矿床的形成主要经历成岩成矿期与改造成矿期, 成岩成矿期矿体呈层状、似层状产出, 产状与岩层一致, 并严格受控于苏维依组下段灰绿色含岩屑钙质细砂岩, 含矿层稳定延伸; 改造成矿期矿体受成岩期后断裂与节理控制, 呈脉状产出, 因此该矿床成矿作用以成岩成矿期为主。

2.3 矿石

金属矿物主要为辉铜矿, 次为孔雀石, 斑铜矿主要见于深部, 见少量铜蓝、磁铁矿等, 偶见少量黄铁矿、赤铜矿、针铁矿。成岩成矿期金属矿物主要为赋存于浸染状、纹层状矿石中的辉铜矿、斑铜矿, 少量黄铁矿, 辉铜矿、斑铜矿主要呈半自形粒状, 脉石矿物主要为石英、长石; 改造成矿期金属矿物主要为赋

存于网脉状矿石中的辉铜矿、孔雀石、少量赤铜矿, 辉铜矿、赤铜矿主要呈他形粒状, 孔雀石呈薄膜状, 脉石矿物主要为石英、长石, 少量方解石。

矿石结构主要有粒状结构、交代残余结构、胶状结构等。在矿石中辉铜矿、铜蓝呈半自形、他形粒状分布于长石、石英等碎屑物之间; 铜蓝及孔雀石沿辉铜矿边缘交代而使辉铜矿呈残余状; 辉铜矿与钙质、泥质等构成岩石中长石、石英等碎屑颗粒的胶结物。常见有长石、石英等碎屑颗粒间被沥青质充填, 以及辉铜矿交代有机质结构等, 沥青质的交代作用使矿石由褐色褪色为灰绿色、浅蓝绿色(王泽利等, 2015)。

矿石中最常见的构造为浸染状、纹层状、网脉状、团块状、薄膜状等(图 4)。浸染状构造指辉铜矿、铜蓝呈半自形、他形粒状分布于矿石中; 纹层状构造指以辉铜矿、孔雀石为主的纹层, 沿层理方向分布于矿石中; 网脉状构造指含辉铜矿、孔雀石的石英方解石脉呈网脉状穿切岩石层理分布于矿石之中或断层破碎带中; 团块状构造指岩石中辉铜矿呈团块状不均匀分布; 薄膜状构造指孔雀石呈粉末状分布于砂岩中。

3 样品及分析测试方法

本次研究在伽师铜矿床拜什塔木矿段 I-1 矿体 1 092 m 中段穿脉中, 对代表成岩成矿期的浸染状、纹层状矿石和断裂裂隙之中代表改造成矿期的含矿石英方解石脉、网脉状矿石系统采集新鲜样品, 共采集约 40 件样品, 单个样品重量多在 1 500 g 左右。对成岩成矿期、改造成矿期石英进行了氢、氧、碳同位素组成测定, 对主要矿石矿物辉铜矿进行了硫同位素测定。

样品碎样及辉铜矿、石英挑选工作由廊坊市峰泽源岩矿检测技术有限公司完成。样品经清洗、晾干, 破碎、过筛至 40 ~ 60 目, 最后在双目镜下挑选纯度大于 99% 的石英单矿物 2 g 以上, 辉铜矿单矿物 5 g 以上。将挑纯后的石英、辉铜矿单矿物研磨至 200 目以下。流体包裹体磨片工作在中国地质调查局西安地质调查中心实验测试中心完成。

本次研究进行了成岩成矿期、改造成矿期流体包裹体测试, 并对两个成矿期石英进行了氢、氧、碳同位素组成测定, 对主要矿石矿物辉铜矿进行了硫同位素测定。

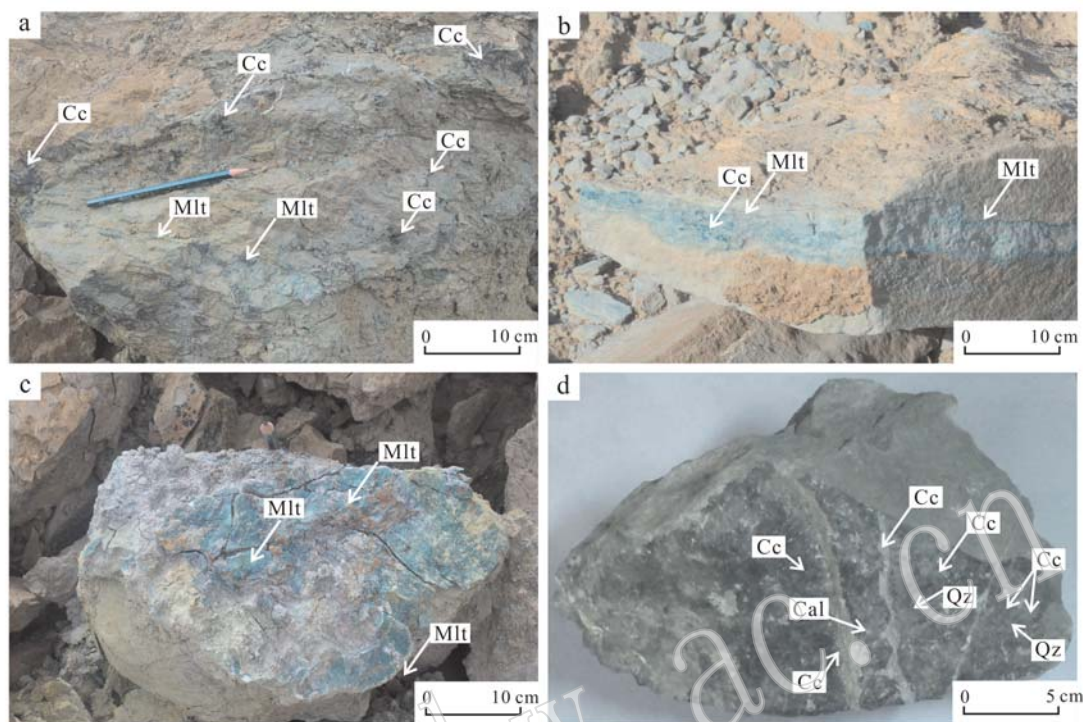


图4 伽师砂岩铜矿矿石宏观组构特征

Fig. 4 Petrofabric characteristics of ores from the Jiashi copper deposit

a—浸染状铜矿石; b—纹层状铜矿石; c—薄膜状铜矿石; d—网脉状铜矿石; Cc—辉铜矿; Mlt—孔雀石; Qz—石英; Cal—方解石
a—disseminated copper ore; b—laminated copper ore; c—thin-film shape copper ore; d—netted vein copper ore;
Cc—chalcocite; Mlt—malachite; Qz—quartz; Cal—calcite

3.1 流体包裹体测试

流体包裹体测试在中国地质调查局西安地质调查中心实验测试中心进行。使用仪器为英国 Renishaw 公司 inVia 型激光拉曼光谱仪和英国 Linkam TMS 94 冷热台。测试中选用 514.5 nm 氩离子激光器,共聚焦模式,输出功率 30 mW,光栅 $1\,800\text{ mm}^{-1}$,狭缝 20 m,物镜 50 倍长焦。测试前用单晶硅片对光谱仪进行校正,确保 520 cm^{-1} 特征峰值偏移小于 0.01 cm^{-1} 。数据采集范围 $2\,800\sim3\,800\text{ cm}^{-1}$,曝光时间 20 s,叠加 10 次。

测试流程为:将密封样品载入冷热台,控制冷热台缓慢降温至 -185°C ,随即升温至 $-50^{\circ}\text{C}\sim-28^{\circ}\text{C}$,观察冰发生“出熔”时,立即停止加热并快速降温至 -185°C ,恒温控制在 -185°C 不变,进行原位拉曼光谱测试。数据处理采用 WIRE4.2 软件。

3.2 氢、氧、碳、硫同位素测试

氢、氧、碳、硫同位素测试工作在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。氢、氧、碳同位素测试使用仪器为 MAT253 稳定同位素质谱仪,硫同

位素分析使用仪器为 Delta V Plus 气体同位素质谱仪。

(1) 氢同位素测试流程:称取 40~60 目石英包裹体样品 5~10 mg,在 105°C 恒温烘箱中烘烤 4 小时以上,用洁净干燥的锡杯包好备用;先用高纯氦气冲洗置换元素分析仪 Flash EA 里面的空气,以降低 H_2 本底。当温度升高到 $1\,400^{\circ}\text{C}$,本底降到 50 mV 以下时,进行样品测试;石英包裹体样品在装有玻璃碳的陶瓷管里爆裂,释放出 H_2O 、 H_2 等含 H 气体, H_2O 及其它可能存在的有机物在高温下与玻璃碳发生还原反应,将含 H 气体还原成 H_2 , H_2 在高纯氦气流的带动下进入 MAT253 气体同位素质谱仪进行分析。测量结果以 SMOW 为标准,记为 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$,分析精度优于 $\pm 1\text{‰}$ 。氢同位素参考标准为国家标准物质北京大学标准水,其 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}} = -64.8\text{‰}$,兰州标准水,其 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}} = -84.55\text{‰}$ 。

(2) 氧同位素测试流程:石英单矿物样品在制样装置达到 10^{-3} Pa 真空条件下,与纯净的五氟化溴在 $500\sim680^{\circ}\text{C}$ 恒温条件下反应 14 h,释放出 O_2 和杂

质组分,将 SiF_4 、 BrF_3 等杂质组分用冷冻法分离出去后,纯净 O_2 在 700°C 且有铂催化剂的条件下,与石墨恒温反应生成 CO_2 ,用冷冻法收集 CO_2 ,在 MAT253 气体同位素质谱分析样品的 O 同位素组成。测量结果以 SMOW 为标准,记为 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 。分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。氧同位素标准参考标准为 GBW-04409、GBW-04410 石英标准,其 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 $11.11 \pm 0.06\text{‰}$ 和 $-1.75 \pm 0.08\text{‰}$ 。

(3) 碳同位素测试流程:根据石英包裹体内 CO_2 、 CH_4 等气体的含量,称取适量的矿物,在真空达 2.0×10^{-2} Pa 条件下,根据不同矿物的爆裂温度进行爆裂,样品与 Cu_2O 反应后,用冷冻法分离除去生成的水,收集纯净的 CO_2 气体,在 MAT253 质谱仪上测量,测得碳同位素组成数据。测量结果以 PDB 为标准,记为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 。分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。参考标准为 GBW04417 方解石标准, $\delta^{13}\text{C}$ 为 -6.06‰ 。

(4) 硫同位素测试流程:将已挑选的辉铜矿单矿物和氧化亚铜按一定比例(视不同的矿物反应完全而定),研磨至 200 目以下,并混合均匀,在真空达 2.0×10^{-2} Pa 状态下加热,进行氧化反应,反应温度为 980°C ,生成 SO_2 气体,真空条件下,用冷冻法收集

SO_2 气体,并用质谱仪分析硫同位素组成,测量结果以 CDT 为标准,记为 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$,分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。硫化物参考标准为 GBW-04414、GBW-04415 硫化银标准,其 $\delta^{34}\text{S}$ 分别为 $-0.07 \pm 0.13\text{‰}$ 和 $22.15 \pm 0.14\text{‰}$ 。

4 流体包裹体和稳定同位素研究

4.1 流体包裹体类型与特征

成矿前包裹体主要为砂岩碎屑中的包裹体,此类包裹体对成矿流体的性质研究意义不大,因此未做讨论,本次集中于成岩成矿期、改造成矿期包裹体的研究。

经显微观察包裹体样品,根据矿物特征与物理相态,总体分为富液相包裹体、纯液相包裹体、气液两相包裹体 3 种类型(图 5),本次样品中三相包裹体极少,仅发现 1 例含液相 CO_2 包裹体。成岩成矿期、改造成矿期包裹体特征如下(表 1):

(1) 成岩成矿期:该期包裹体主要为富液相、纯液相和少量气液两相包裹体,分别占比约 60%、30%、10%,主要存在于成岩成矿期形成的浸染状、

表 1 伽师铜矿床矿石矿物流体包裹体特征

Table 1 Characteristics of fluid inclusions of the copper ores in the Jiashi copper deposit

样号	成矿期	寄主岩石	赋存矿物	大小/ μm	气液比/%	冰点温度/ $^\circ\text{C}$	均一温度/ $^\circ\text{C}$	测点数
JS-LT1	成岩成矿期	浸染状、纹层状砂岩矿石	石英次生加大边	$1 \times 2 \sim 3 \times 4$	5~15	-5.7~-0.7	175~188	3
JS-LT2			石英次生加大边	$2 \times 3 \sim 2 \times 3$	5~10	-5.9~-0.2	159~174	3
JS-LT4			胶结物状石英	$2 \times 3 \sim 4 \times 5$	5~10	-5.5~-4.6	185~206	5
JS-LT6			石英次生加大边	$1 \times 1 \sim 2 \times 2$	5~15	-6.5~-6.3	145~151	3
JS-LT7			石英次生加大边	$2 \times 2 \sim 4 \times 5$	5~10	-6.1~-5.6	152~158	3
JS-LT9			胶结物状石英	$2 \times 3 \sim 6 \times 8$	5~8	-4.7~-2.2	134~145	3
JS-LT10			石英次生加大边	$2 \times 2 \sim 4 \times 5$	5~8	-5.0~-4.6	131~135	3
JS-LT1	改造成矿期	网脉状铜矿化石英-方解石脉	石英	$2 \times 3 \sim 4 \times 7$	10~15	-3.1~-2.8	275~282	2
JS-LT2			石英	$2 \times 4 \sim 4 \times 6$	10~20	-2.7~-0.7	249~267	4
JS-LT3			方解石	$3 \times 5 \sim 3 \times 7$	10~25	-2.7~-2.1	131~139	2
JS-LT4			石英	$2 \times 4 \sim 2 \times 6$	10~15	-5.0~-3.5	182~188	3
JS-LT6			方解石	$2 \times 3 \sim 3 \times 7$	10~20	-4.7~-1.6	151~155	3
JS-LT7			石英	$1 \times 3 \sim 2 \times 6$	10~15	-5.9~-2.8	239~250	2
JS-LT8			石英	$2 \times 3 \sim 4 \times 12$	10~20	-5.2~-2.0	278~285	3
JS-LT9			方解石	$1 \times 4 \sim 3 \times 14$	10~25	-6.1~-2.5	241~249	2
JS-LT10			石英	$2 \times 3 \sim 3 \times 6$	10~15	-5.0~-0.3	207~218	4

纹层状矿石中辉铜矿、斑铜矿等金属硫化物附近的石英次生加大边、方解石胶结物中。该成矿期包裹体分布不均匀,总体沿石英次生加大边呈带状分布或成群沿晶面分布。形态以圆形、椭圆形为主,包裹体个体较小,多数在 $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m} \sim 4\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 之间,大者可达 $6\ \mu\text{m} \times 8\ \mu\text{m}$,富液相包裹体气液比5%~8%,纯液相包裹体由单一液相水构成,气液两相包裹体由气相-液相构成,气液比10%~15%,最高可达45%左右(图5a、5b)。

(2) 改造成矿期: 该成矿期包裹体为气液两相

包裹体,主要存在于断裂裂隙内含矿石英方解石脉的石英及方解石之中。其分布不均匀,大多呈串珠状定向排列或散点状分布。包裹体形态多样,以椭圆形、长条形或不规则形状为主,少量呈负晶形,包裹体个体相对较大,多数为 $2\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m} \sim 4\ \mu\text{m} \times 7\ \mu\text{m}$,大者可达 $4\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$,由气相-液相构成,气液比10%~25%(图5c、5d)。

含 CO_2 的三相包裹体: 本批样品仅发现1例,见于改造成矿期含矿石英脉中,大小约 $8\ \mu\text{m}$,可能源于深部热液活动所带来。

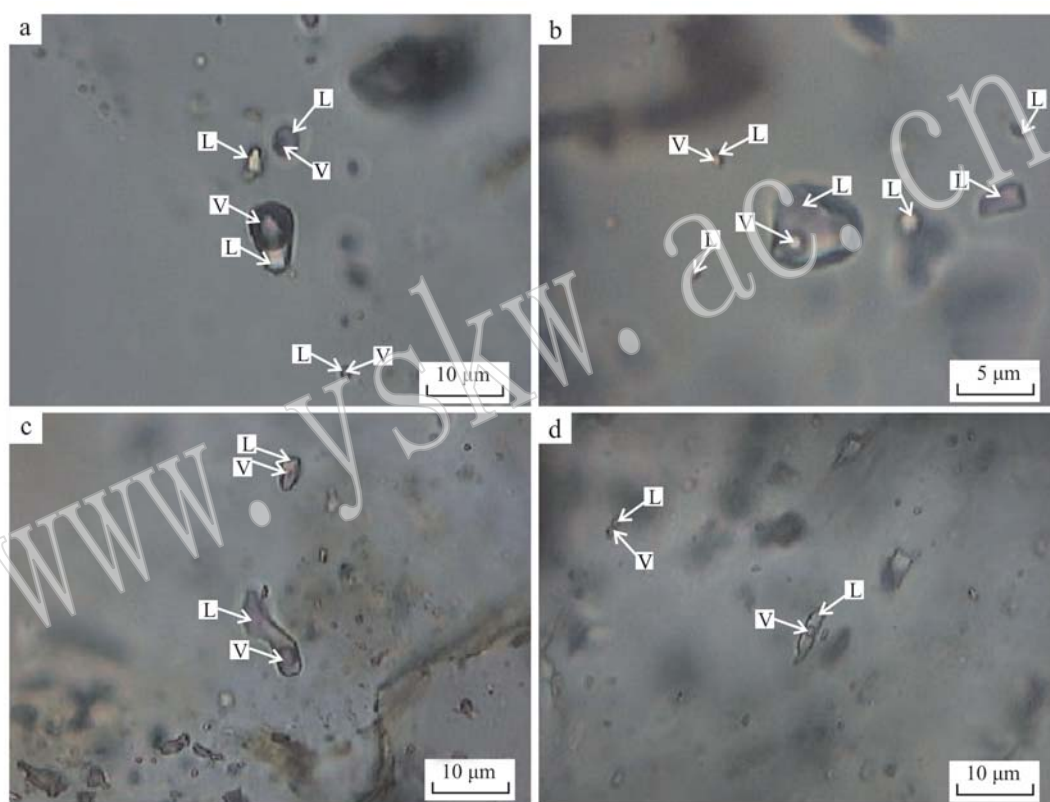


图5 伽师铜矿不同期次成矿流体形成的包裹体类型照片

Fig. 5 Fluid inclusion microphotographs of the Jiashi deposit

a、b—成岩成矿期包裹体; c、d—改造成矿期包裹体; L—液相; V—气相

a, b—fluid inclusions in diagenetic metallogenic period; c, d—fluid inclusions in reformation metallogenic period; L—liquid phase; V—vapor phase

4.2 流体包裹体显微测温及成分分析

本次研究选择浸染状、纹层状、团块状、网脉状容矿砂岩,对代表成岩成矿期石英、方解石胶结物和改造成矿期含矿石英方解石脉中的包裹体测定其均一温度、冰点温度,并分析气相、液相成分,然后进行盐度、密度、压力换算。

4.2.1 显微测温结果

包裹体测温表明(表2),伽师铜矿床成矿流体

成岩成矿期的温度为 $131 \sim 206^\circ\text{C}$,主要集中在 $145 \sim 188^\circ\text{C}$,平均 163°C ;改造成矿期的温度为 $131 \sim 285^\circ\text{C}$,主要集中在 $151 \sim 258^\circ\text{C}$,平均 222°C 。

盐度计算利用低盐度包裹体-冰点关系表(Bodnar, 1993)换算获得。结果表明(表2),伽师铜矿床成矿流体成岩成矿期的盐度范围在 $0.35\% \sim 9.86\%$ (NaCl_{eq} ,质量分数,下同),平均 6.99% ;改造成矿期的盐度为 $0.53\% \sim 9.34\%$,平均 4.92% 。

表 2 伽师铜矿不同期次流体的冰点温度、均一温度、盐度、密度、压力范围及均值

Table 2 Ranges and averages of homogeneous temperature, salinity, density and pressure in different stages of fluid inclusions in the Jiashi copper deposit

样号	成矿期	冰点温度/℃		均一温度/℃		盐度/%		流体密度/g·cm ⁻³		流体压力/MPa		测点数
		范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	
JS-LT1	成岩成矿期	-5.7~-0.7		175~188		1.23~8.81		0.90~0.96		247~438		3
JS-LT2		-5.9~-0.2		159~174		0.35~9.08		0.91~0.96		227~445		3
JS-LT4		-5.5~-4.6		185~206		7.31~8.55		0.92~0.95		397~428		5
JS-LT6		-6.5~-6.3	-4.5	145~151	163	9.60~9.86	6.99	0.99~0.99	0.96	458~464	390	3
JS-LT7		-6.1~-5.6		152~158		8.68~9.34		0.97~0.98		431~451		3
JS-LT9		-4.7~-2.2		134~145		3.71~7.45		0.95~0.98		296~400		3
JS-LT10		-5.0~-4.6		131~135		7.31~7.86		0.99~0.99		397~411		3
JS-LT1	改造成矿期	-3.1~-2.8		275~282		4.65~5.11		0.83~0.84		329~340		2
JS-LT2		-2.7~-0.7		249~267		1.23~4.49		0.84~0.90		247~329		4
JS-LT3		-2.7~-2.1		131~139		3.55~4.49		0.94~0.95		305~325		2
JS-LT4		-5.0~-3.5		182~188		5.71~7.86		0.82~1.00		360~448		3
JS-LT6		-4.7~-1.6	-3.1	151~155	222	2.74~7.45	4.92	0.83~0.93	0.87	280~400	338	3
JS-LT7		-5.9~-2.8		239~250		4.65~9.08		0.84~0.89		333~445		2
JS-LT8		-5.2~-2.0		278~285		3.39~8.14		0.78~0.82		300~418		3
JS-LT9		-6.1~-2.5		241~249		4.18~9.34		0.80~0.89		321~448		2
JS-LT10		-5.0~-0.3		207~218		0.53~7.86		0.85~0.92		231~411		4

密度与压力计算据刘斌等(2000)提出的算法获得,结果表明(表 2)伽师铜矿成矿流体成岩期密度为 0.90~0.99 g/cm³,均值为 0.96 g/cm³,压力为 227~464 MPa,均值为 390 MPa;改造期密度为 0.78~1.00 g/cm³,均值为 0.87 g/cm³,压力为 231~448 MPa,均值为 338 MPa。

4.2.2 激光拉曼成分特征

激光拉曼探针分析表明(表 3、表 4),伽师铜矿床成矿流体成岩成矿期气相成分主要为 CH₄、H₂S,并含有 H₂、N₂,液相成分主要为 H₂O,含少量 CH₄、H₂S、CO₂;改造成矿期气相成分主要为 CO₂、N₂、H₂,并含 CH₄,液相成分主要为 H₂O,个别样品液相成分主要为 CO₂。

4.3 硫同位素特征

伽师铜矿 10 个硫同位素测定数据显示(表 5),δ³⁴S 全部为负值,范围为 -34.5‰~-22.7‰,平均 -28.39‰。

4.4 氢氧同位素特征

氢氧同位素分析表明(表 6),伽师铜矿成岩成矿期石英中包裹体水的δD值为 -105.4‰~-79.2‰,

改造成矿期石英包裹体水的 δD 值为 -108.5‰~-81.3‰。

表 3 伽师铜矿床流体包裹体气相成分激光拉曼探针分析结果 %

Table 3 Laser Raman data of gas components of the fluid inclusions in the Jiashi copper deposit

样号	成矿期	CO ₂	H ₂ S	CH ₄	N ₂	H ₂	总和
JS-LT1	成岩成矿期			86.2	13.8		100.0
JS-LT2				78.1		21.9	100.0
JS-LT4				93.3		6.7	100.0
JS-LT6				52.5	47.5		100.0
JS-LT7			31.5	68.5			100.0
JS-LT9			37.8	62.2			100.0
JS-LT10			23.5	76.5			100.0
JS-LT1	改造成矿期	71.7		7.1		21.2	100.0
JS-LT2				7.9	87.6	4.5	100.0
JS-LT3		94.8			5.2		100.0
JS-LT4				3.1	78.6	18.3	100.0
JS-LT6				4.3	86.6	9.1	100.0
JS-LT7		97.5			2.5		100.0
JS-LT8				29.6		70.4	100.0
JS-LT9		88.8		2.4		8.8	100.0
JS-LT10					85.8	14.2	100.0

表4 伽师铜矿床流体包裹体液相成分激光拉曼探针

分析结果 %

Table 4 Laser Raman data of liquid components of the fluid inclusions in the Jiashi copper deposit

样号	成矿期	CO ₂	H ₂ S	CH ₄	H ₂ O	总和
JS-LT1	成岩成矿期	0.19	0.01	0.02	99.98	100.0
JS-LT2					99.81	100.0
JS-LT4					100.00	100.0
JS-LT6					100.00	100.0
JS-LT7					100.00	100.0
JS-LT9					100.00	100.0
JS-LT10				0.12	99.88	100.0
JS-LT1	改造成矿期	100.00		0.28		100.0
JS-LT2					100.00	100.0
JS-LT3					100.00	100.0
JS-LT4					100.00	100.0
JS-LT6					99.72	100.0
JS-LT7					100.00	100.0
JS-LT8					100.00	100.0
JS-LT9					100.00	100.0
JS-LT10					100.00	100.0

表5 伽师铜矿床辉铜矿单矿物硫同位素组成

Table 5 Sulfur isotopic compositions of chalcocite monomineral from the Jiashi copper deposit

样号	矿物	样品特征	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
JS-TW1	辉铜矿	灰色浸染状矿石	-26.9
JS-TW2	辉铜矿	灰色网脉状矿石	-34.5
JS-TW3	辉铜矿	灰色网脉状矿石	-30.4
JS-TW4	辉铜矿	灰色浸染状矿石	-32.3
JS-TW5	辉铜矿	灰色纹层状矿石	-28.5
JS-TW6	辉铜矿	灰色团块状矿石	-23.6
JS-TW7	辉铜矿	灰色纹层状矿石	-22.7
JS-TW8	辉铜矿	灰色浸染状矿石	-30.2
JS-TW9	辉铜矿	灰色团块状矿石	-26.2
JS-TW10	辉铜矿	灰色浸染状矿石	-28.6

伽师铜矿成岩成矿期 $\delta^{18}\text{O}$ 为 12.7‰ ~ 14.2‰, 平均 13.6‰, 改造成矿期 $\delta^{18}\text{O}$ 为 12.2‰ ~ 14.7‰, 平均 12.9‰, 根据石英-水的氧同位素分馏方程(1)(转引自张理刚, 1985)及(2)(引自郑永飞等, 2000)计算了伽师铜矿成矿流体的氧同位素组成(表1)。

$$1\,000\ln\alpha_{\text{石英-水}} \approx 3.57 \times 10^6 / T^2 - 2.73 \quad (1)$$

式(1)、(2)中 T 为均一温度(K)。

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{石英}} - 1\,000\ln\alpha_{\text{石英-水}} \quad (2)$$

换算得到成岩成矿期成矿流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 变化范围为 -3.13‰ ~ 0.87‰, 平均 -1.66‰, 改造成矿期成矿流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 变化范围为 -4.21‰ ~ 4.04‰, 平均 -0.99‰。

表6 伽师铜矿床氢氧同位素组成

Table 6 H-O isotopic data of the Jiashi copper deposit

样号	样品对象	成矿期	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	均一温度/K	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$
JS-T1	石英	成岩成矿期	-105.4	14.2	471.5	0.87
JS-T2			-79.2	13.9	429.5	-2.73
JS-T3			-87.1	12.7	438.6	-3.13
JS-T4			-81.3	12.2	467.0	-1.44
JS-T5	石英	改造成矿期	-88.4	12.5	428.6	-4.21
JS-T6			-96.5	12.9	555.1	4.04
JS-T7			-108.5	12.7	442.4	-2.81
JS-T8			-96.1	12.6	442.8	-2.88
JS-T9			-99.4	12.5	454.4	-2.06
JS-T11			-89.2	14.7	487.6	2.41

4.5 碳同位素特征

通过矿石中石英矿物的碳同位素测定(表7), 显示区内成岩成矿期 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -28.4‰ ~ -24.2‰, 平均 -26.1‰, 改造成矿期 $\delta^{13}\text{C}$ 值 -28.5‰ ~ -23.0‰, 平均值也为 -26.1‰, 二者变化范围相近。

表7 伽师铜矿床石英单矿物碳同位素组成

Table 7 Carbon isotopic compositions of quartz monomineral from the Jiashi copper deposit

样号	矿物	成矿期	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
JS-T1	石英	成岩成矿期	-28.4
JS-T2	石英		-24.2
JS-T3	石英		-25.7
JS-T4	石英	改造成矿期	-25.3
JS-T5	石英		-26.3
JS-T6	石英		-27.2
JS-T7	石英		-28.5
JS-T8	石英		-26.0
JS-T9	石英		-26.6
JS-T11	石英		-23.0

5 讨论

5.1 成矿流体性质与来源

伽师铜矿流体包裹体研究表明: 该矿床主要发育富液相、纯液相和气液两相包裹体, 含 CO_2 三相包裹体仅见1例。成岩期富液相、纯液相包裹体数量较多, 相对较为发育, 改造期气液两相包裹体数量相对较少, 指示成岩期成矿流体作用更明显, 成岩期应

为该矿床主要成矿期。

包裹体测温获得该矿床成岩成矿期成矿流体均一温度为 131 ~ 206℃, 平均 163℃, 盐度为 0.35% ~ 9.86% (NaCl_{eq} , 质量分数, 下同), 平均 6.99%, 流体密度为 0.90 ~ 0.99 g/cm^3 , 平均 0.96 g/cm^3 , 流体压力为 227 ~ 464 MPa, 平均 390 MPa; 改造成矿期成矿流体均一温度为 131 ~ 285℃, 平均为 222℃, 盐度为 0.53% ~ 9.34%, 平均 4.92%, 流体密度为 0.78 ~ 1.00 g/cm^3 , 平均 0.87 g/cm^3 , 流体压力为 231 ~ 448 MPa, 平均 338 MPa。由此可知, 伽师铜矿成岩成矿期、改造成矿期成矿流体总体表现为中低温、中压、中低盐度、中等密度特征, 具有典型地下热卤水特点。盐度、流体密度和流体压力从成岩成矿期向改造成矿期均有降低的趋势, 这可能与成岩成矿期成矿流体埋深大于改造成矿期成矿流体所造成。而成矿流体改造期的温度高于成岩期的温度, 可能与改造期区域强烈的构造运动关系密切(杨克绳, 2005; 何登发等, 2005), 受构造挤压应力的作用, 成岩期形成的砂岩层发生变形, 在超过岩石变形极限时发生破碎, 砂岩内初始储存的应变能将通过热能的形式释放, 也即断层碾压、摩擦作用产生热能, 使得断层中含矿流体温度上升。

激光拉曼探针成分分析显示, 伽师铜矿床成矿流体成岩成矿期气相成分主要为 CH_4 、 H_2S , 并含有少量 H_2 、 N_2 , 液相成分主要为 H_2O , 含少量 CH_4 、 H_2S 、 CO_2 , 改造成矿期气相成分主要为 CH_4 、 CO_2 、 N_2 、 H_2 , 液相成分主要为 H_2O , 个别样品液相成分主要为 CO_2 , 总体代表还原性流体。 CH_4 与 H_2S 通常为有机质裂解形成, 是烃源岩生烃-排烃作用的产物, 形成于油气还原作用过程之中, 结合伽师铜矿矿石特征、区域油气特征(吕修祥等, 1996, 2014; 顾雪祥等, 2010; 王泽利等, 2015; 方维萱等, 2016), 表明该矿床成岩成矿期、改造成矿期成矿流体均含有油田卤水成分, 也即有机质参与了铜的成矿作用。

伽师铜矿 10 个硫同位素测定数据显示, $\delta^{34}\text{S}$ 全部为负值, 范围为 -34.5‰ ~ -22.7‰ , 平均 -28.39‰ 。前人对塔里木陆块西北缘多个陆相砂岩型铜矿测定过其硫同位素组成, 测得伽师铜矿 7 件辉铜矿其 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 -33.4‰ ~ -24.6‰ 范围内, 全部为负值(王思程等, 2011), 萨热克铜矿 6 件辉铜矿其 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 -24.0‰ ~ -19.0‰ 范围内, 亦全部为负值(李志丹等, 2011)。塔里木陆块西北缘及我国南方陆相砂岩型铜矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体显示为以负值

为主, 值域范围较大的特征, 这与全球诸多特大、超大型砂岩铜矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值特征相吻合, 均源于硫酸盐细菌还原及有机质还原(Haynes, 1986; Sweeney *et al.*, 1991; 谭凯旋, 1998)。伽师铜矿苏维依组下段含矿层下部发育巨厚层石膏岩, 下伏寒武系-奥陶系、石炭系-二叠系为优质烃源岩(吕修祥等, 2014), 结合岩石胶结物中常见沥青质, 以及辉铜矿交代有机质结构、沥青质交代作用使矿石发生褪色等地质特征(王泽利等, 2015), 也是伽师铜矿的硫源于硫酸盐细菌还原及油田卤水中有机质还原的强力佐证。

氢氧同位素分析表明, 伽师铜矿成岩成矿期石英中包裹体水的 δD 值为 -105.4‰ ~ -79.2‰ , 改造成矿期石英包裹体水的 δD 值为 -108.5‰ ~ -81.3‰ , 经换算得到成岩成矿期成矿流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 变化范围为 -3.13‰ ~ 0.87‰ , 平均 -1.66‰ , 改造成矿期成矿流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 变化范围为 -4.21‰ ~ 4.04‰ , 平均 -0.99‰ 。将伽师铜矿成矿流体的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值投到 δD - $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图上(图6), 显示伽师铜矿成岩期、改造成矿期成矿流体主要源自大气降水及盆地卤水, 而且均有有机水参与。结合区域油气特征, 有机水应源自油田卤水。

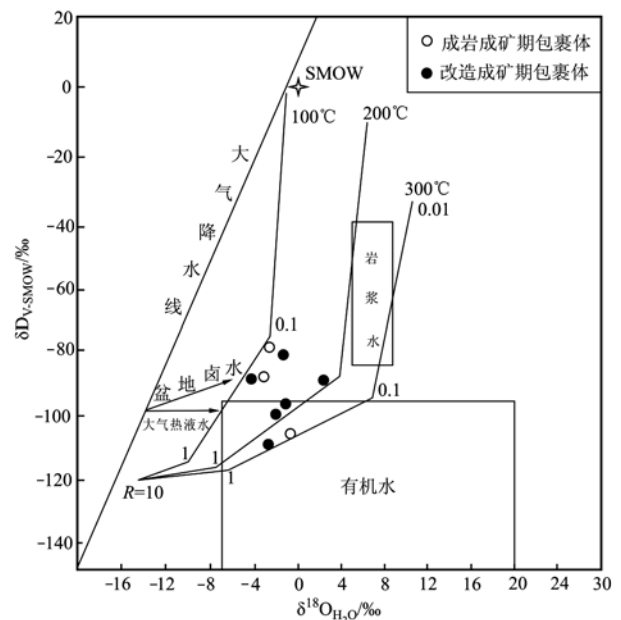


图6 伽师铜矿成矿流体的水/岩同位素交换 δD - $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图
(底图引自谭凯旋, 1998)

Fig. 6 Plot of δD - $\delta^{18}\text{O}$ for water/rock isotopic exchange of ore-forming fluids in the Jiashi copper deposit (after Tan Kaixuan, 1998)

该矿床碳同位素数据表明,区内成岩成矿期 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-28.4\text{‰} \sim -24.2\text{‰}$,平均 -26.1‰ ,改造成矿期 $\delta^{13}\text{C}$ 值 $-28.5\text{‰} \sim -23.0\text{‰}$,平均值也为 -26.1‰ ,二者变化范围相近,和自然界有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 的负值范围特征一致(郭远生等,2008),表明有机质均参与了成岩期、改造期成矿作用过程。

5.2 成矿作用分析

伽师铜矿成矿作用主要经历两个时期:成岩成矿期、改造成矿期,以成岩成矿期为主。

氢、氧、碳同位素特征表明,伽师铜矿成岩期、改造成矿流体来源主要为大气降水、盆地卤水及有机水;硫同位素特征表明,该矿床硫主要源自硫酸盐细菌还原和有机质还原;激光拉曼探针成分分析表明伽师铜矿成岩成矿期、改造成矿期成矿流体均含有油田卤水成分;因此有机质参与了成岩期、改造期铜的成矿作用。

成岩成矿期:该矿床含铜物源来源于盆地周缘寒武-白垩系和南天山造山带含铜岩石的风化剥蚀并沉积,形成伽师铜矿源层——古近系苏维依组红色碎屑岩夹巨厚膏岩建造(王思程等,2011;张江,2011;张振亮等,2014;唐小东等,2014)。大气降水、盆地卤水等多来源流体与矿源层发生两种反应:一是与矿源层红色碎屑岩发生长期的水岩作用,萃取矿源层中 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 离子等金属元素;二是与膏岩层发生反应,使其中的硫酸盐、卤化物等溶解,获取 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 等阴离子,二者混合形成氧化性含矿热卤水(郭远生等,2008;刘增仁等,2010;曹养同等,2010;祝新友等,2011;王思程等,2011;吴海枝等,2016)。早期形成的中低温、中压、中低盐度、中等密度的含矿热卤水在苏维依组具有较高孔隙度、渗透性的砖红色砂岩中运移、储集,随着沉积厚度加大,受上覆岩层压力驱动,下伏石炭系-二叠系烃源岩生烃-排烃作用形成的富含 CH_4 、 H_2S 等成分的还原性油田卤水向上运移(吕修祥等,1996,2014;李椿等,2001;杨庚,2003;顾雪祥等,2010;王泽利等,2015),与氧化性含矿热卤水在柯坪塔格背斜层间引张地段、背斜转折端等构造部位聚集,发生氧化-还原反应,油气还原作用使得油田卤水中富含的有机质、硫酸盐细菌将含矿热卤水中的硫酸盐还原为 S^{2-} 、 HS^- 等,还原环境下与 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 等在强渗透性苏维依组砂岩中生成斑铜矿、辉铜矿等原生铜硫化物,于上述容矿有利位置富集形成层状、似层状铜矿体,矿石呈浸染状、纹层

状构造等,并在含矿砂岩石英次生加大边、方解石胶结物中形成和保存包裹体,由于成矿空间内温度、压力相对均匀,因此形成形态较规则的富液相、纯液相(少量气液两相)圆形、椭圆形包裹体。矿体上下层渗透性差的泥岩层、膏岩层对矿体起到良好的保存作用。油气还原作用还将 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ,生成黄铁矿,使得氧化-还原界面附近的红色砂岩褪色为灰绿色等浅色砂岩。

改造成矿期:受区域强烈的构造运动影响,成岩期后发生较为强烈的断裂活动(汤良杰,1994;杨克绳,2005),使得成岩成矿期铜矿体被破坏,改造期石英 δD 值为 $-108.5\text{‰} \sim -81.3\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $-4.21\text{‰} \sim 4.04\text{‰}$,指示改造期成矿流体主要为大气降水与盆地卤水的混合,改造期流体共同活化被构造破碎的成岩期铜矿体,使原生硫化物氧化分解,形成具有中低温、中压、中低盐度、中等密度特征的含矿热卤水,且断裂活动产生的热量使得这一时期成矿流体温度($131 \sim 285^\circ\text{C}$)相对高于成岩期含矿流体温度($131 \sim 206^\circ\text{C}$),促进被构造运动破坏的成岩期铜矿体活化形成氧化性含矿热卤水,并沿断裂通道向下运移,随着压力增加,深部烃源岩生烃-排烃作用形成的富含有机质成分的还原性油田卤水向上运移(改造成矿期氢、氧、碳同位素分析表明这一时期成矿流体含有有机水成分),两种流体在断层及层间破碎带中相遇,发生氧化-还原反应,经油气还原作用生成铜蓝、孔雀石、赤铜矿等次生铜硫化物(或铜氧化物)及少量辉铜矿,形成脉状矿体。改造期矿石呈网脉状、团块状构造等,并在含矿石英方解石脉的石英及方解石之中形成和保存包裹体,由于断裂带内压力释放,温度相对升高,因此形成形态较不规则的气液两相型长条形、不规则状或椭圆形包裹体。

6 结论

(1) 伽师铜矿成矿作用经历成岩成矿期、改造成矿期两个主要成矿期,以成岩成矿期为主。该矿床两个成矿期气相成分主要为 CH_4 、 H_2S 、 CO_2 、 N_2 、 H_2 ,液相成分主要为 H_2O ,表明两个主要成矿期成矿流体均含有油田卤水成分。流体包裹体显微测温研究表明,该铜矿成岩成矿期、改造成矿期成矿流体总体表现为中低温、中压、中低盐度、中等密度特征,具有典型地下热卤水特点。

(2) 伽师铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-34.5\text{‰} \sim -22.7\text{‰}$,表

明该矿床的硫主要源自硫酸盐细菌还原和有机质还原。该矿床成岩期包裹体水的 δD 值为 $-105.4‰ \sim -79.2‰$ 、 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 为 $-3.13‰ \sim 0.87‰$ ，改造期 δD 值为 $-108.5‰ \sim -81.3‰$ ， $\delta^{18}O_{H_2O}$ 为 $-4.21‰ \sim 4.04‰$ ，表明成矿流体为大气降水、盆地卤水混合来源，并有有机水加入。其成岩期 $\delta^{13}C$ 值为 $-28.4‰ \sim -24.2‰$ ，改造期 $\delta^{13}C$ 值为 $-28.5‰ \sim -23.0‰$ ，表明有机质均参与了成岩期、改造期成矿作用过程。

(3) 伽师铜矿成岩成矿期、改造成矿期含矿热卤水与油田卤水发生氧化-还原作用而成矿，油田卤水中有机质成分在成矿过程中起重要还原作用，该矿床成因为沉积-改造型矿床，属于砂岩型铜矿。

致谢 论文成文过程中得到中国地质调查局西安地质调查中心陈隽璐研究员、王志海高工的指导，并得到叶美芳工程师、董会工程师的热情帮助，在此一并致谢。

References

- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H_2O -NaCl solutions[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 57: 683 ~ 684.
- Chen Genwen, Wu Yanzhi, Xia Bin, *et al.* 2002. Isotopic characteristics and genesis of sandstone-type copper deposits in the Chuxiong Basin, Yunnan Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 26(3): 35 ~ 41 (in Chinese).
- Cong Peizhang, Zhao Yunping and Shi Longqing. 2016. Analysis on ore-body characteristics and genetic mechanism of Jiashi copper deposit [J]. *Mining Engineering*, 14(6): 3 ~ 5 (in Chinese).
- Cao Yangtong, Liu Chenglin, Chen Yongzhi, *et al.* 2010. Characteristics of copper mineralization in the Kuqa Forland Basin, and Origin, enrichment and distribution of copper[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(12): 1 791 ~ 1 804 (in Chinese).
- Fang Weixuan, Jia Runxing, Guo Yuqian, *et al.* 2016. Hydrocarbon-rich basin fluid with reducibility and metallogenic mechanism for glutenite-type Cu-Pb-Zn-U in the Western of Tarim Basin[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 38(6): 727 ~ 752 (in Chinese).
- Gu Xuexiang, Zhang Yongmei, Li Baohua, *et al.* 2010. The coupling relationship between metallization and hydrocarbon accumulation in sedimentary basins[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 83 ~ 105 (in Chinese).
- Guo Yuansheng and Luo Rongsheng. 2008. The Geology of Sandstone-type Copper Deposits in Central Yunnan[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Publishing House, 44 ~ 149 (in Chinese).
- Haynes D W. 1986. Stratiform copper deposits hosted by low-energy sediments; I, Timing of sulfide precipitation, an hypothesis[J]. *Economic Geology*, 81(2): 250 ~ 265.
- He Dengfa, Jia Chengzao, Li Desheng, *et al.* 2005. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 26(1): 64 ~ 77 (in Chinese).
- Li Chun, Wang Yanli, Du Honglie, *et al.* 2001. Evaluation of source rocks in Keping area, Tarim basin[J]. *Journal of Xinjiang Petroleum Institute*, 13(1): 22 ~ 25 (in Chinese).
- Li Zhidan, Xue Chunji, Xin Jiang, *et al.* 2011. Geological characteristics and S-Pb-isotope geochemistry of Sareke copper deposit in Wuqia county, Xinjiang[J]. *Geoscience*, 25(4): 720 ~ 729 (in Chinese).
- Liu Bin, Zhu Silin and Shen Kun. 2000. Softwares and Examples for Calculating the Thermodynamic Parameters of Fluid Inclusions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 84 (in Chinese).
- Liu Zengren, Chen Zhengle, Han Fengbin, *et al.* 2010. The relationship between oil-gas reduction and mineralization of Wulagen lead-zinc deposit in Kashi, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 29: 1 049 ~ 1 050 (in Chinese).
- Lü Xiuxiang, Bai Zhongkai, Xie Yuquan, *et al.* 2014. Reconsideration on petroleum exploration prospects in the Kalpin thrust belt of Northwestern Tarim basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(4): 766 ~ 775 (in Chinese).
- Lü Xiuxiang and Yan Junjun. 1996. Hydrocarbon prospects of Keping area on the Northwestern margin of Tarim basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(3): 32 ~ 39 (in Chinese).
- Sweeney M A, Binda P L and Vaughan D J. 1991. Genesis of the ores of the Zambian Copperbelt[J]. *Ore Geology Reviews*, 6: 51 ~ 76.
- Nian Wuqiang, Luo Weidong, Shi Yujun, *et al.* 2007. Geological characteristics and prospecting indicators of sandstone copper deposit in Jiashi of Xinjiang province[J]. *Gansu Geology*, 16(1 ~ 2): 28 ~ 33 (in Chinese).
- Ran Chongying and Liu Weihua. 1993. Geochemistry of Copper Deposits and Their Mechanism of Storeyed Texture in Kangdian Axis[M]. Beijing: Science Press, 56 ~ 159 (in Chinese).
- Tan Kaixuan. 1998. Geochemistry and Ore-Forming Dynamics of Sandstone-type Copper Deposits[M]. Beijing: Seismological Press, 19 ~ 83 (in Chinese).
- Tan Kaixuan, Gong Wenjun, Li Xiaoming, *et al.* 1999. the tectonic-fluid-metallogenetic system of sandstone type copper deposits in Diwa

- basins and its evolution[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 23(1): 35~41(in Chinese).
- Tang Xiaodong, Tuo Xiaoshuang, Mi Dengjiang, *et al.* 2014. Research on provenance and sedimentary environment of Suweiyi formation of Baishentamu area, Southwest Tianshan mountainous region, Xinjiang [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 29(4): 579~586(in Chinese).
- Tu Guangchi. 1984. *Geochemistry of Chinese Stratabound Deposits*, Vol 1[M]. Beijing: Science Press, 264~286(in Chinese).
- Tu Guangchi. 1988. *Geochemistry of Chinese Stratabound Deposits*, Vol 3[M]. Beijing: Science Press, 255~311(in Chinese).
- Tang Liangjie. 1994. Evolution and tectonic patterns of Tarim Basin[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 19(6): 742~754(in Chinese).
- Wang Sicheng, Xue Chunji and Li Zhidan. 2011. Geology and S-Pb-isotopic geochemistry of the Jiashi sandstone-type copper deposit, Xinjiang, China[J]. *Geoscience*, 25(2): 219~227(in Chinese).
- Wang Zeli, Si Ruyi, Zhao Yuanfang, *et al.* 2015. Nappe tectonic control of Jiashi sandstone copper deposit, Xinjiang, China[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology*, 34(6): 25~31(in Chinese).
- Wu Haizhi, Han Runsheng and Wu Peng. 2016. Properties and evolution of ore-forming fluid in Liuju sandstone type copper deposit, Chuxiong Basin in Yunnan Province, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(2): 398~411(in Chinese).
- Xiao Rongge, Chen Huiquan, Shuai Kaiye, *et al.* 1994. Organic mineralization of sediment-hosted copper deposits[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, (1): 38~41(in Chinese).
- Yang Geng. 2003. The analyses on NW-striking paleouplift and the hydrocarbon potential, northwest Tarim [J]. *Xinjiang Geology*, 21(2): 157~162(in Chinese).
- Yang Kesheng. 2005. Tectonic Evolution of the Tarim Basin[J]. *Marine Geology Letters*, 21(2): 25~29, 38.
- Yang Weihua and Liu Youmei. 1983. *Geochemistry of Mesozoic stratabound copper deposits in central Yunnan*[J]. *Science in China (Ser. B)*, (9): 833~842(in Chinese).
- Zhang Jiang. 2011. Geological characteristics and the genetic model of Jiashi Copper deposit in Xinjiang [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 26(4): 373~377(in Chinese).
- Zhang Ligang. 1985. The Application of the Stable Isotope to Geology [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Publishing House, 54~120(in Chinese).
- Zhang Zhenliang, Feng Xuanjie, Dong Fuchen, *et al.* 2014. Type, genesis and exploration direction of glutenite-hosted ore deposits in the Southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 47(3): 70~82(in Chinese).
- Zhao Zuying and Tang Xiaodong. 2003. Geological characteristics and utilization prospects of sandstone copper deposits of Neogene in Xikeer [J]. *Xinjiang Geology*, 21(1): 141~142(in Chinese).
- Zheng Yongfei and Chen Jiangfeng. 2000. *Stable Isotope Geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 10~15(in Chinese).
- Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Wang Yujie, *et al.* 2011. The geologic characteristics of Sareke copper deposit, Xinjiang, China—ore genesis related to basin brines[J]. *Mineral Exploration*, 2(1): 28~35(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈根文, 吴延之, 夏 斌, 等. 2002. 楚雄盆地砂岩铜矿床同位素特征及矿床成因[J]. *大地构造与成矿学*, 26(3): 279~284.
- 丛培章, 赵云平, 施龙青. 2016. 伽师铜矿矿体特征及矿床成因分析[J]. *矿业工程*, 14(6): 3~5.
- 曹养同, 刘成林, 陈永志, 等. 2010. 库车前陆盆地古近系-新近系铜矿化特征及铜的来源、富集分布初探[J]. *地质学报*, 84(12): 1791~1804.
- 方维萱, 贾润幸, 郭玉乾, 等. 2016. 塔西地区富烃类还原性盆地流体与砂砾岩型铜铅锌-铀矿床成矿机制[J]. *地球科学与环境学报*, 38(6): 727~752.
- 顾雪祥, 章永梅, 李葆华, 等. 2010. 沉积盆地中金属成矿与油气成藏的耦合关系[J]. *地学前缘*, 17(2): 83~105.
- 郭远生, 罗荣生. 2008. 滇中砂岩铜矿地质[M]. 昆明: 云南科技出版社, 44~149.
- 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 2005. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. *石油与天然气地质*, 26(1): 64~77.
- 李 椿, 王艳丽, 杜鸿烈, 等. 2001. 塔里木盆地柯坪地区烃源岩评价[J]. *新疆石油学院学报*, 13(1): 22~25.
- 李志丹, 薛春纪, 辛 江, 等. 2011. 新疆乌恰县萨热克铜矿床地质特征及硫、铅同位素地球化学[J]. *现代地质*, 25(4): 720~729.
- 刘 斌, 朱思林, 沈 昆. 2000. 流体包裹体热力学参数计算软件及算例[M]. 北京: 地质出版社, 1~84.
- 刘增仁, 陈正乐, 韩凤彬, 等. 2010. 新疆喀什乌拉根铅锌矿油气还原迹象与成矿作用关系初析[J]. *矿床地质*, 29(S1): 1049~1050.
- 吕修祥, 白忠凯, 谢玉权, 等. 2014. 塔里木盆地西北缘柯坪地区油气勘探前景再认识[J]. *沉积学报*, 32(4): 766~775.
- 吕修祥, 严俊君. 1996. 塔里木盆地西北缘柯坪地区油气前景[J].

- 沉积学报, 14(3): 32~39.
- 年武强, 罗卫东, 石玉君, 等. 2007. 新疆伽师砂岩型铜矿地质特征及找矿标志[J]. 甘肃地质, 16(1~2): 28~33.
- 冉崇英, 刘卫华. 1993. 康滇地轴铜矿床地球化学和矿床层楼结构机理[M]. 北京: 科学出版社, 56~159.
- 谭凯旋. 1998. 砂岩铜矿地球化学和成矿动力学[M]. 北京: 地震出版社, 19~83.
- 谭凯旋, 龚文君, 李小明, 等. 1999. 地洼盆地砂岩铜矿床的构造-流体-成矿体系及演化[J]. 大地构造与成矿学, 23(1): 35~41.
- 唐小东, 妥小双, 米登江, 等. 2014. 新疆西南天山拜什塔木地区苏维依组物源区及沉积环境探讨[J]. 地质找矿论丛, 29(4): 579~586.
- 涂光炽. 1984. 中国层控矿床地球化学(第一卷)[M]. 北京: 科学出版社: 264~286.
- 涂光炽. 1988. 中国层控矿床地球化学(第三卷)[M]. 北京: 科学出版社: 255~311.
- 汤良杰. 1994. 塔里木盆地构造演化与构造样式[J]. 地球科学, 19(6): 742~754.
- 王思程, 薛春纪, 李志丹. 2011. 新疆伽师砂岩型铜矿床地质及S、Pb同位素地球化学[J]. 现代地质, 25(2): 219~227.
- 王泽利, 司如一, 赵远方, 等. 2015. 试论新疆伽师砂岩型铜矿的推覆构造控制[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 34(6): 25~31.
- 吴海枝, 韩润生, 吴 鹏. 2016. 楚雄盆地六苴砂岩型铜矿床成矿流体性质及演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 46(2): 398~411.
- 肖荣阁, 陈卉泉, 帅开业, 等. 1994. 沉积岩铜矿床的有机聚矿作用[J]. 矿物岩石地球化学通讯, (1): 38~41.
- 杨 庚. 2003. 塔里木西北缘北西向古隆起的存在及油气勘探前景[J]. 新疆地质, 21(2): 157~162.
- 杨克绳. 2005. 塔里木盆地的构造演化[J]. 海洋地质动态, 21(2): 25~29, 38.
- 杨蔚华, 刘友梅. 1983. 滇中中生代层控铜矿床的地球化学[J]. 中国科学(B辑), (9): 833~842.
- 张 江. 2011. 新疆伽师铜矿床地质特征及成因模式[J]. 地质找矿论丛, 26(4): 373~377.
- 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, 54~120.
- 张振亮, 冯选洁, 董福辰, 等. 2014. 西南天山砂砾岩容矿矿床类型及找矿方向[J]. 西北地质, 47(3): 70~82.
- 赵祖应, 唐晓东. 2003. 西克尔新近系砂岩型铜矿床地质特征及开发利用前景[J]. 新疆地质, 21(1): 141~142.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 10~15.
- 祝新友, 王京彬, 王玉杰, 等. 2011. 新疆萨热克铜矿——与盆地卤水作用有关的大型矿床[J]. 矿产勘查, 2(1): 28~35.