

文章编号: 0258-7106(2012)06-1184-11

东昆仑水闸东沟-黄龙沟金矿床硫化物矿物学特征对可见金形成条件的制约*

张金阳¹, 马昌前^{2,3}, 李建威^{1,2}

(1 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074; 2 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 东昆仑五龙沟地区水闸东沟-黄龙沟金矿床处于昆中断裂北部, 受NW向构造控制, 矿区出露中元古界小庙组和新元古界丘吉东沟组地层, 岩浆岩以早古生代和早中生代侵入岩为主。围岩蚀变以绢云母化和硅化为主, 矿体严格受NW向剪切带控制, 赋矿岩石为早古生代正长花岗岩和新元古代丘吉东沟组板岩。综合野外地质特征、矿相学观察和电子探针测试结果, 水闸东沟-黄龙沟金矿床可划分出4个成矿期: 沉积期、热液Ⅰ期、热液Ⅱ期和表生期。新元古代沉积期属金的初步富集期, 早古生代热液Ⅰ期可分为4个阶段, 其中第一阶段(磁黄铁矿-毒砂-斜方砷铁矿-自然金阶段)是金的主成矿阶段, 早中生代热液Ⅱ期金再次活化富集, 表生期代表矿体暴露地表后的变化。热液Ⅰ期的磁黄铁矿-毒砂-斜方砷铁矿-自然金阶段, 由早至晚体系温度和硫逸度升高, 代表前进变质作用, 变质条件达绿片岩相上限。斜方砷铁矿交代毒砂的结构中通常可以观察到可见金, 说明该阶段是由不可见金向可见金转化的重要时期, 可见金形成于绿片岩相上限的温度范围内。

关键词 地球化学; 硫化物; 矿物学; 可见金; 金矿床; 五龙沟; 东昆仑
中图分类号 P618.51 **文献标志码** A

Visible gold-forming environment evidenced by sulfide mineralogical characteristics of Shuizhadonggou-Huanglonggou gold deposit in eastern Kunlun orogen

ZHANG JinYang¹, MA ChangQian^{2,3} and LI JianWei^{1,2}

(1 Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3 Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract

The Shuizhadonggou-Huanglonggou gold deposit of eastern Kunlun orogen is located in the north of the Middle Kunlun fault and controlled by NW-trending structures. The Mesoproterozoic Xiaomiao Formation and Neoproterozoic Qiuji Donggou Formation are exposed in the ore district, and Early Paleozoic and Early Mesozoic intrusions constitute the main magmatic rocks in the region. Alteration mainly includes sericitization and silicification. Ore bodies occur within Early Paleozoic syenogranite and Neoproterozoic slate and are strictly controlled by the NW-trending shear zone. On the basis of field work, ore microscopy and electron probe analyses, the au-

* 本文受到中国地质调查局地质调查工作项目(1212011121270和1212010918002)、中央高校基本科研业务费专项资金(CUG120102)和国家自然科学基金青年科学基金项目(40903017)资助

第一作者简介 张金阳, 男, 1977年生, 博士, 副教授, 从事岩浆岩石学及相关矿床研究。Email: zhangjinyang@cug.edu.cn
收稿日期 2012-01-05; 改回日期 2012-11-02。秦思婷编辑。

thors recognized four metallogenic periods. The Neoproterozoic sedimentary period was a period of initial enrichment of gold. The Early Paleozoic hydrothermal period could be further divided into four ore-forming stages, of which the first was the main gold ore-forming stage (pyrrhotite-arsenopyrite-löellingite-native Au stage). Gold was activated and concentrated again during the third Early Mesozoic hydrothermal period. The fourth period represented a hypogene process. Temperature and sulfur fugacity increased during the pyrrhotite-arsenopyrite-löellingite-native Au stage, which represented progressive metamorphism and attained the upper greenschist facies. Visible gold appears near the boundary between arsenopyrite and löellingite, which was probably related to the replacement of arsenopyrite by löellingite, and hence the visible gold must have been formed under the condition of the upper greenschist facies.

Key words: geochemistry, sulfide, mineralogy, visible gold, gold deposit, Wulonggou, eastern Kunlun orogen

金通常与硫化物和硫砷化物共生,通过对金共生矿物的研究揭示金的形成条件,是金矿成因研究的重要组成部分(Tomkins et al., 2001; Cook et al., 2009; Bi et al., 2011)。通常情况下,金在硫化物和硫砷化物中,以可见金与不可见金($<1 \mu\text{m}$)的形态存在,称为双峰式分布(Morey et al., 2008)。其中,不可见金主要有晶格金和显微包裹体金(Morey et al., 2008),多形成于金的早期富集阶段(Large et al., 2007; 2009; Morey et al., 2008);可见金指在反光显微镜尺度下就可观察到的自然金,形成于较晚的主成矿期热液阶段(Large et al., 2011),往往与水-岩反应、围岩硫化、相分离和流体混合等过程密切相关(Mikucki, 1998)。在造山型金矿床中,控制可见金形成的条件通常以一种到两种为主(Su et al., 2008),如Morey等(2008)研究的澳大利亚Yilgarn克拉通太古代造山型金矿,认为其可见金的形成与热液温度和硫逸度的升高有关;但Hayashi等(1991)通过金的溶解实验研究,发现硫逸度的降低有利于金的形成,温度升高或降低对金形成的影响非常有限。因此,可见金的形成条件还有待进一步深入研究和探讨。

水闸东沟-黄龙沟金矿床是东昆仑五龙沟金矿田的组成部分,该区近年来金矿找矿工作取得了重大突破,新增金资源量近40 t,平均品位约4.5 g/t,矿体的延伸(深)仍未封闭,是一个具有较好找矿前景的大型金矿床。岩金沟金矿床是五龙沟金矿田的重要组成部分,最初被认为与外滩杂岩体在时、空、源方面具有成生联系(李厚民等, 2001a),矿石中的金以可见金及显微包裹金的形式赋存于毒砂、含砷黄铁矿等硫化物和硫砷化物中(李厚民等, 2001b);但近年来,该矿床被认为形成于印支期造山碰撞晚

期,具有造山型金矿的特征(丰成友等, 2003; 张德全等, 2005)。本文对水闸东沟-黄龙沟金矿床主要金属矿物开展了详细的矿相学观察和电子探针分析,探讨其可见金的形成条件及金富集的阶段性和

1 矿床地质特征

五龙沟金矿田处于东昆仑中部构造带,矿田内构造线呈NW向,主体由3条NW向近平行展布的剪切带和4个轴向呈NW向延伸的褶皱构成,它们奠定了本区基本构造格架(钱壮志等, 1999)。水闸东沟-黄龙沟金矿床属五龙沟金矿田的组成部分,主要受萤石沟-红旗沟剪切带和萤石沟-红旗沟倒转复向斜控制(张延林等, 2011)。矿区地层为中元古界小庙组和新元古界丘吉东沟组(图1a)。小庙组主要为黑云斜长片麻岩、黑云石英片岩夹少量大理岩,是经历了低角闪岩相变质的一套火山-沉积岩系,碎屑锆石年代学证实其形成时代为1683~1554 Ma(陈有炘等, 2011)。丘吉东沟组下部为片岩、砾岩段,主要为片理化变质砾岩、砂岩、千枚岩夹大理岩组成,与下伏小庙组呈角度不整合接触关系;上部为变火山岩段,由片理化凝灰质、硅质板岩,变火山碎屑岩等组成。丘吉东沟组具丰富的叠层石和微古植物组合,形成时代为新元古代中-晚期,属浅海相沉积(余能, 2005)。矿区岩浆岩以侵入岩为主,形成时代以早古生代和早中生代为主(图1a、b)。早古生代侵入岩构成区内侵入岩的主体,主要包括砖红色-肉红色粗粒正长花岗岩、灰白色中粒正长花岗岩和少量闪长岩,LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄介于450~410 Ma之间(陆露, 2011; 马昌前未发表数据)。早中生代侵入岩主要为浅成岩体,主要岩石类型为灰白色花岗闪长斑

岩和灰绿色-浅色闪长玢岩脉, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄约为 220 Ma (马昌前未发表数据)。

水闸东沟-黄龙沟金矿床矿体严格受萤石沟-红旗沟剪切带控制, 矿体赋存岩性大部分为灰白色中粒正长花岗岩, 部分为丘吉东沟组蚀变的黄铁绢英岩和凝灰质板岩等(图 1a)。矿体呈半隐伏、隐伏的脉状、透镜状, 常见分支、复合与膨缩, 主矿体的延深多大于延长。矿体走向以 NWW、NW 向为主, 倾向以 NNE 向、NE 向为主, 倾角均较陡。矿体在空间上具有侧列再现和尖灭再现的群聚规律, 常常分段集中、局部富集, 可分为水闸东沟矿段与黄龙沟矿段, 矿段间为贫矿或无矿地段, 整体构成 NW 向蚀变带(图 1a, 张延林等, 2011)。与金矿相关的围岩蚀变明显叠加在糜棱岩化变形之上, 主要为绢云母化、黄铁矿化、硅化和碳酸盐化。绢云母化主要发育在正长花岗岩中, 长石类矿物多被绢云母化, 黄铁矿化呈细脉状和浸染状 2 种形式; 硅化表现为规模较小的

石英脉和局部呈矩形石英的集合体; 碳酸盐化普遍发育, 主要呈团块和细脉的形式分布。蚀变整体上沿上、下盘具有不对称分带性的特征。

矿石主要为蚀变岩型, 矿石矿物组成相对简单, 矿物颗粒大小不超过 1 mm, 含量不超过 5%, 主要为黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、斜方砷铁矿、方铅矿、闪锌矿和少量白铁矿、黄铜矿、辉钼矿、石墨和自然金。脉石矿物主要有绢云母、石英、绿泥石、方解石、萤石等。矿石结构包括粒状结构、环带结构、交代结构、镶边结构、自形粒状代晶结构、交叉网状结构等。矿石构造以浸染状构造为主, 可见少量各类脉状构造。各类脉绝大多数发育在黄龙沟, 宽度一般小于 1 cm, 极少数脉宽可达 10 cm, 脉的种类主要为石英-粗粒黄铁矿脉(图 2a)、方解石-粗粒黄铁矿脉(图 2b)、石英-方铅矿-闪锌矿脉(图 2c、d)、石英-细粒黄铁矿脉(图 2e、f)。在极少数较宽的石英-粗粒黄铁矿脉中可见绢云母(图 2a), 部分石英-方铅矿-闪锌

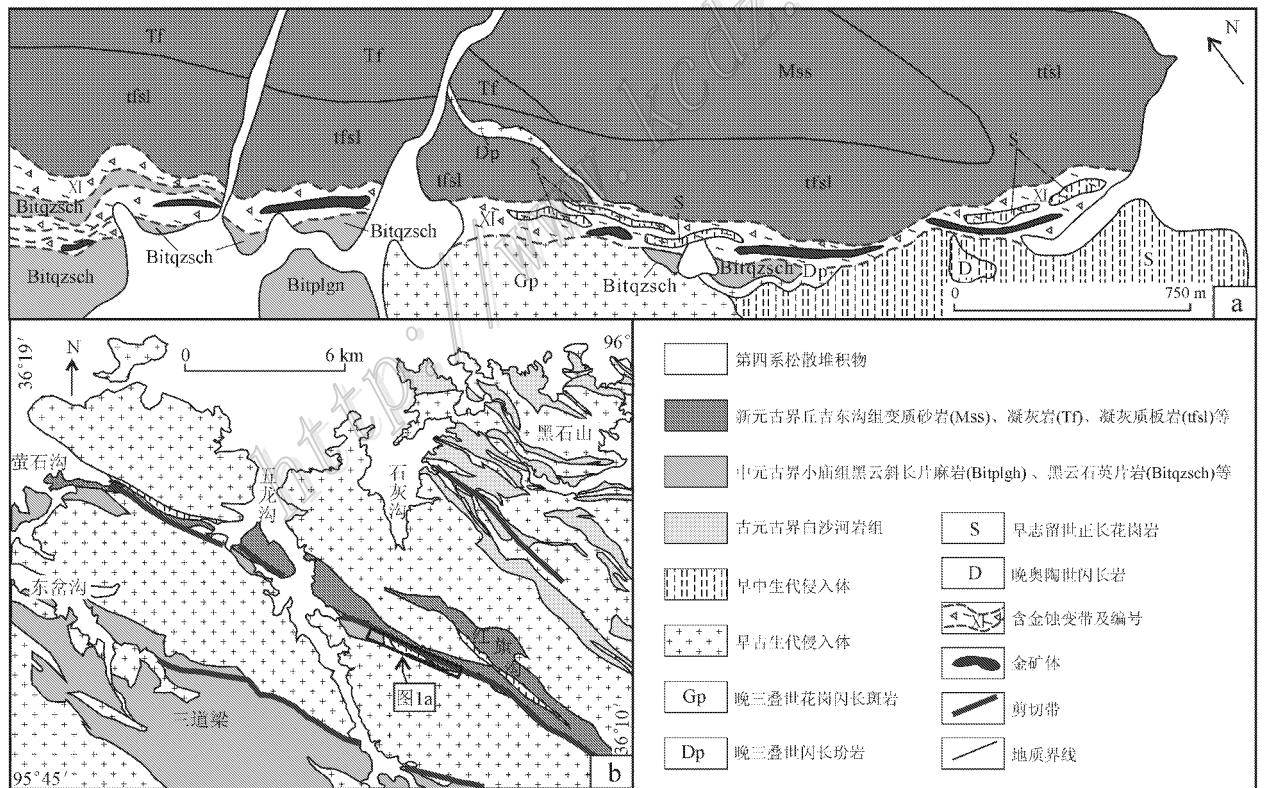


图 1 东昆仑五龙沟地区水闸东沟-黄龙沟金矿床地质简图(a)(据张延林等, 2011 修改)及东昆仑五龙沟地区地质简图(b)(据 1:5 万诺木洪幅地质图修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the Shuizhadonggou-Huanglonggou gold deposit in eastern Kunlun orogen(a) (modified after Zhang et al., 2011) and simplified geological map of Wulonggou region in eastern Kunlun(b) (modified after 1:50000 Geological Map of Nuomuhong Sheet)

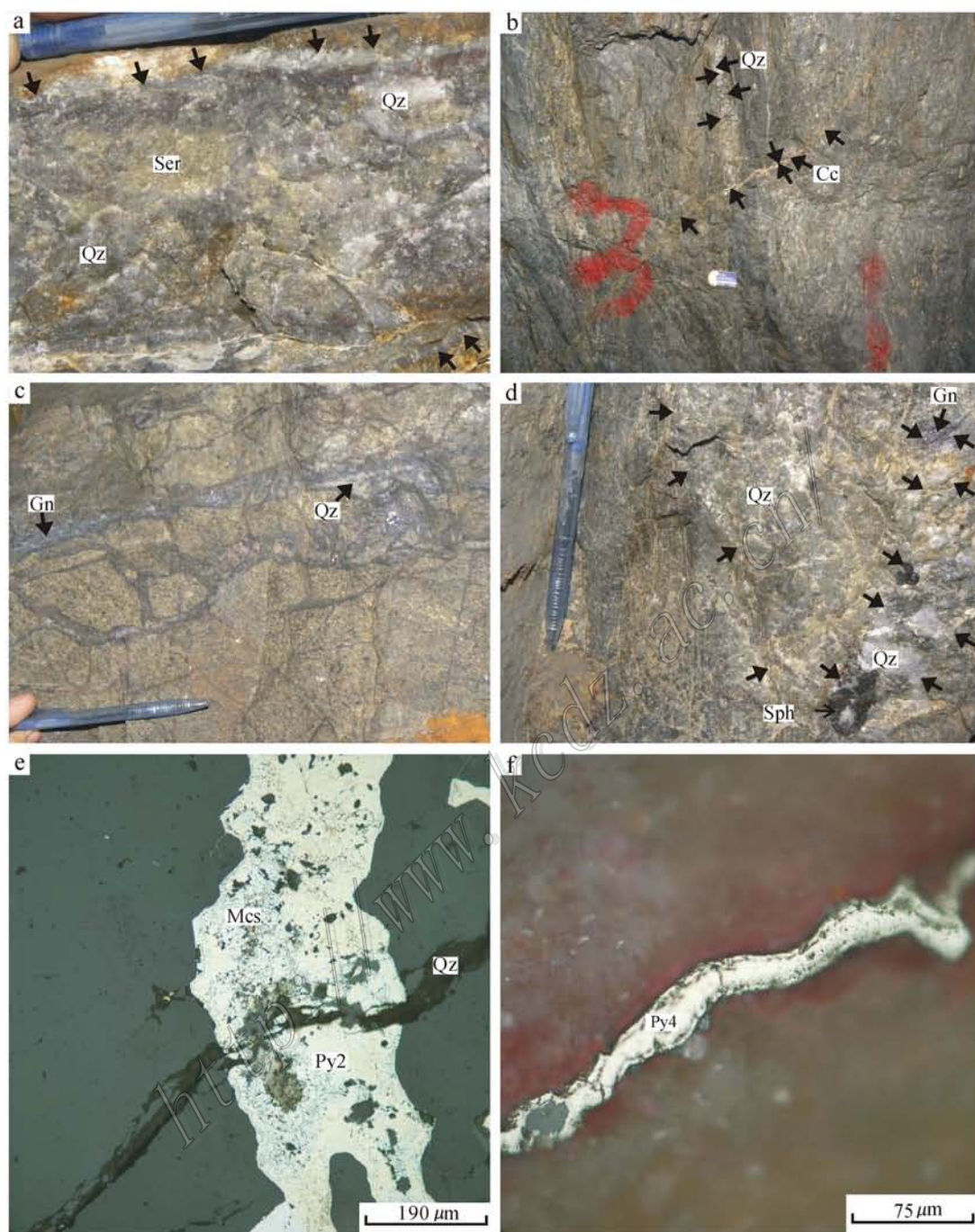


图 2 东昆仑水闸东沟-黄龙沟金矿床各类脉体及其穿插关系

a. 石英(Qz)-粗粒黄铁矿-绢云母(Ser)脉; b. 方解石(Cc)脉穿过石英-粗粒黄铁矿脉; c. 网状石英-方铅矿(Gn)-闪锌矿脉; d. 石英-方铅矿-闪锌矿(Sph)脉穿插在石英-粗粒黄铁矿脉中; e. 石英-粗粒黄铁矿脉穿过石英-粗粒黄铁矿(Py2)脉,粗粒黄铁矿属于下文的中期第一代黄铁矿,部分粗粒黄铁矿发生白铁矿化(Mcs)(反射光); f. 石英-细粒黄铁矿(Py4)脉,黄铁矿沿垂直脉壁方向显示分带性,属于下文的晚期黄铁矿(反射光),图中脉体与图 2e 所示的脉属同一脉体的不同部分

Fig. 2 Field relationships of all kinds of veins from the Shuizhadonggou-Huanglonggou gold deposit

a. Quartz (Qz)-coarse-grained pyrite-sericite (Ser) vein; b. Quartz-coarse-grained pyrite vein cut by calcite (Cc) vein; c. Quartz-galena (Gn)-sphalerite stockwork; d. Quartz-coarse-grained pyrite vein cut by quartz-galena-sphalerite (Sph) vein; e. Quartz-coarse-grained pyrite (Py2) vein cut by quartz-fine-grained pyrite vein, part of coarse-grained pyrite replaced by marcasite (Mcs), reflected light; f. Quartz-fine-grained pyrite vein showing zoned structure, vein from Fig. e and f being the same one, reflected light

矿脉中可见萤石,少数方解石脉中未见黄铁矿。石英-细粒黄铁矿脉宽度为微米级,仅局部出现,在镜下方可识别(图 2e、f)。野外可见各类脉体穿过浸染状矿石或蚀变岩,方解石脉穿过石英-粗粒黄铁矿脉(图 2b),石英-方铅矿-闪锌矿脉穿过石英-粗粒黄铁矿脉(图 2d),镜下可见石英-细粒黄铁矿脉穿过石英-粗粒黄铁矿脉(图 2e)和石英-方铅矿-闪锌矿脉。因此,各类脉形成的先后次序是:石英-粗粒黄铁矿脉→石英-方铅矿-闪锌矿脉→方解石-粗粒黄铁矿脉或石英-细粒黄铁矿脉。方解石-粗粒黄铁矿脉和石英-细粒黄铁矿脉的先后次序还不清楚,将在下文进一步讨论。

2 主要金属矿物特征及矿物生成顺序

详细的矿相学观察表明,矿石中的黄铁矿形成于 3 个成矿期。早期黄铁矿(Py1,图 3a、b)含量较少,但在水闸东沟和黄龙沟普遍发育,呈环带状和筛状结构。环带状黄铁矿表现为核部他形黄铁矿周缘发育多期胶体环带,核部黄铁矿颗粒大小约 0.1 mm,环带部分可见垂直或接近垂直环带的放射状裂隙或裂纹,胶体物质重结晶特征明显,由于后期热液交代使得环带形态保存不完整(图 3a);筛状黄铁矿具残余结构,呈筛状特征,颗粒大小 0.3~0.7 mm(图 3b)。早期黄铁矿被磁黄铁矿(图 3a)、方铅矿等矿物交代,中晚期黄铁矿大多产于黄龙沟。中期黄铁矿可划分为 2 个世代,第一世代粗粒黄铁矿(Py2,图 2e)和石英组成细脉穿插在矿石或蚀变岩中,细脉宽度 2~7 mm 不等,少数脉宽可达 10 cm,黄铁矿粒度 0.5 mm 左右,大部分黄铁矿都属于该世代;第二世代粗粒黄铁矿和方解石组成细脉,黄铁矿颗粒大小约 0.4 mm。晚期黄铁矿(Py4,图 2e、f,图 3f)颗粒最小(小于微米级),和石英一起组成单脉或交叉网状细脉交代磁黄铁矿、毒砂、闪锌矿和粗粒黄铁矿等矿物,细脉宽度约 10 μm (图 2e,图 3f),仅局部地段出现,但若出现则密集分布。由于石英-细粒黄铁矿脉穿过包括粗粒黄铁矿在内的所有主要金属矿物,因此是最晚形成的。

磁黄铁矿、斜方砷铁矿、毒砂和自然金组合含量最高,呈浸染状分布在矿石中,属于同一阶段,磁黄铁矿颗粒大小约 0.3 mm 或更小,可见自形的毒砂呈自形代晶结构交代磁黄铁矿(图 3c),毒砂代晶颗粒大小 5~10 μm ,可见黄铁矿呈宽约 10~40 μm 的

镶边状交代磁黄铁矿,黄铁矿被白铁矿呈镶边状交代(图 3d)。毒砂可观察到 3 个世代,第一世代毒砂体现自形的特征,大小约 5~15 μm ,多见呈交代晶体交代磁黄铁矿(图 3c)或者被闪锌矿交代(图 3e);第二世代毒砂(Apy2)呈他形的特征,与斜方砷铁矿紧密共生(图 4a、b),前 2 个世代毒砂处同一阶段,含量较多;第三世代毒砂与中期第一世代粗粒黄铁矿共同产于石英脉中,含量很少,较自形,早于黄铁矿形成。斜方砷铁矿与毒砂紧密相伴,可见斜方砷铁矿呈尖角状交代毒砂,使毒砂呈港湾状的形态(图 4a、b),部分界线处交代关系不明显,但未见明显的毒砂呈尖角状交代斜方砷铁矿并使之呈港湾状,证实总体上斜方砷铁矿形成晚于毒砂。与该交代作用相关的磁黄铁矿均分布在斜方砷铁矿或毒砂内部,如在斜方砷铁矿内部,则分布在其中央;如在毒砂内部,则靠近毒砂与斜方砷铁矿的边界。自然金颗粒大小 5~10 μm ,数量较少,形态不规则,多分布在斜方砷铁矿和毒砂颗粒边缘或靠近边缘,少量分布于石英裂隙中,具有成群产出的特征。中期黄铁矿可见被白铁矿交代,呈较细环边状或不规则尖角状。

3 主要金属矿物的矿物化学特征

用于电子探针分析的样品岩性和位置见表 1,主要矿物的电子探针成分见表 2,主要硫化物矿相图见图 5。电子探针分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,仪器型号为 JXA-8800M,测试时加速电压为 15 kV,束斑直径为 1 μm 。

斜方砷铁矿的成分较为均一,其 $w(\text{As})$ 为 67.44%~71.49%、 $w(\text{Fe})$ 为 27.47%~30.00%、 $w(\text{S})$ 为 1.16%~3.33%。

不同产状的毒砂成分有较大差别,交代磁黄铁矿的毒砂(第一世代) $w(\text{As})$ 为 40.61%~42.15%、 $w(\text{Fe})$ 为 35.22%~37.03%、 $w(\text{S})$ 为 22.09%~22.76%,被闪锌矿交代的毒砂(第一世代) $w(\text{As})$ 为 42.86%~43.45%、 $w(\text{Fe})$ 为 34.41%~35.31%、 $w(\text{S})$ 为 20.82%~21.71%,被斜方砷铁矿交代的毒砂(第二世代) $w(\text{As})$ 为 45.88%~48.50%、 $w(\text{Fe})$ 为 32.87%~34.97%、 $w(\text{S})$ 为 16.91%~19.04%;与石英-粗粒黄铁矿共生的少量毒砂(第三世代) $w(\text{As})$ 为 44.84%、 $w(\text{Fe})$ 为 35.12%、 $w(\text{S})$ 为 20.12%。

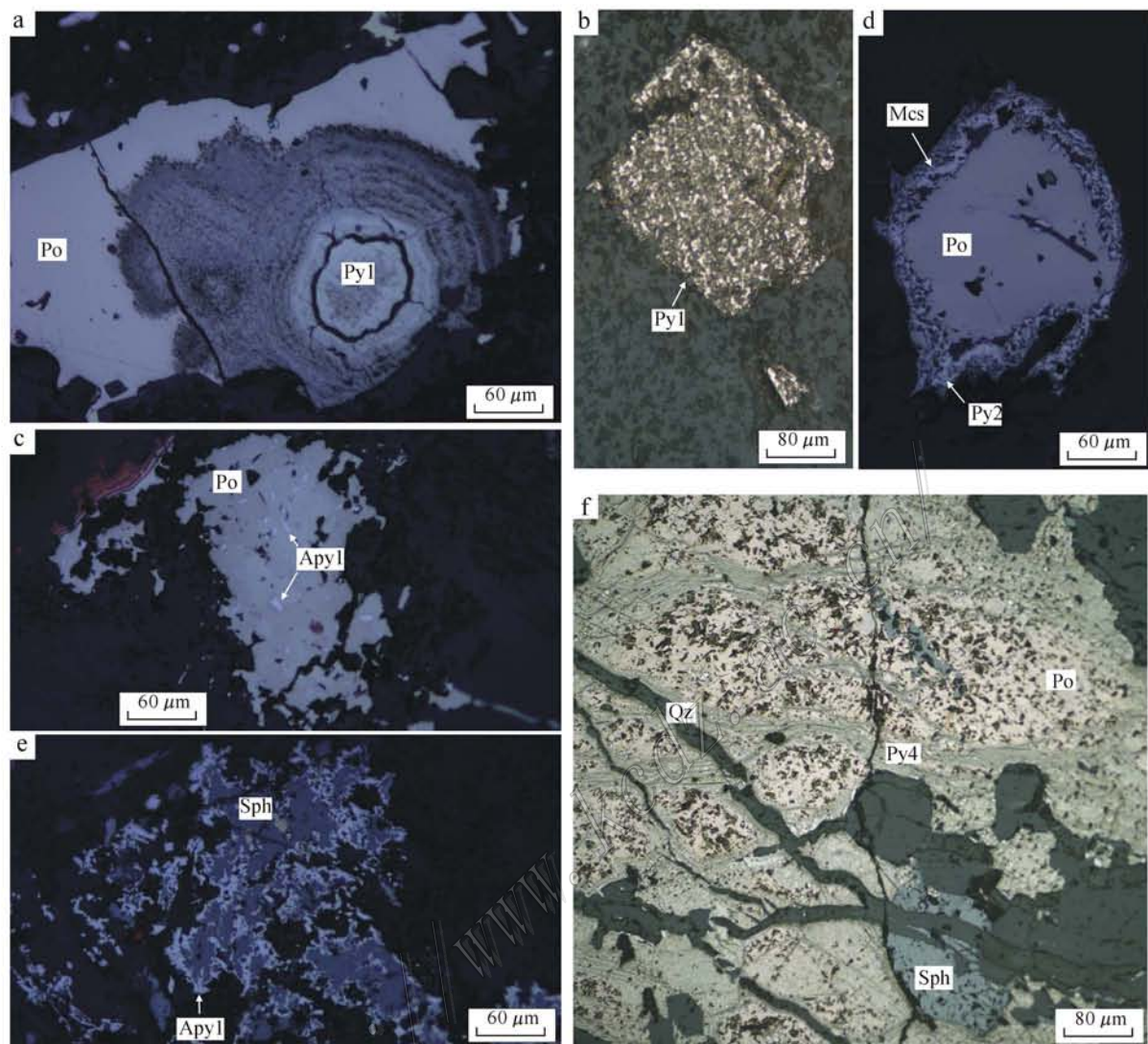


图3 东昆仑水闸东沟-黄龙沟金矿床硫化物显微镜下照片

- a. 早期环带状黄铁矿(Py1)被磁黄铁矿(Po)交代; b. 呈残余特征的筛状早期黄铁矿(Py1); c. 第一代自形毒砂(Apy1)交代磁黄铁矿; d. 中期第一代黄铁矿(Py2)呈环带状交代磁黄铁矿, 环带状黄铁矿又被白铁矿(Mcs)交代; e. 闪锌矿(Sph)交代第一代自形毒砂; f. 晚期黄铁矿(Py4)-石英(Qz)细网脉交代磁黄铁矿和闪锌矿

Fig. 3 Microscopic images of sulfides from the Shuizhadonggou-Huanglonggou gold deposit

- a. Zoned pyrite (Py1) replaced by pyrrhotite (Po); b. Sieved pyrite (Py1); c. Euhedral arsenopyrite (Apy1) replacing pyrrhotite; d. Ringed pyrite (Py2) replacing pyrrhotite and replaced by marcasite; e. Sphalerite (Sph) replacing euhedral arsenopyrite; f. Pyrite (Py4)-quartz stockwork replacing pyrrhotite and sphalerite

磁黄铁矿化学式为 Fe_9S_{10} , 成分略有差别, 与斜方砷铁矿交代毒砂关系密切的磁黄铁矿略富砷, 其 $w(Fe)$ 为 58.77% ~ 61.11%, $w(S)$ 为 37.75% ~ 39.16%, $w(As)$ 为 0.10% ~ 0.14%; 其他产状的磁黄铁矿 $w(Fe)$ 为 58.18% ~ 60.38%, $w(S)$ 为 39.34% ~ 39.67%, 砷含量很低, 甚至低于检测限。

不同成矿期的黄铁矿成分变化有限, 其 $w(Fe)$ 为 44.89% ~ 46.81%, $w(S)$ 为 50.89% ~ 53.71%,

早期黄铁矿硫含量略低。当黄铁矿含金时, 其砷的含量也高。白铁矿成分与黄铁矿类似。

闪锌矿的成分较为一致, 其 $w(Fe)$ 为 8.86% ~ 10.20%, $w(Zn)$ 为 55.20% ~ 57.31%, $w(S)$ 为 33.63% ~ 34.10%。

金含量测试结果显示, 早期黄铁矿可检测到金, 晚期细粒黄铁矿也可检测到金。除此之外, 大部分金分布于斜方砷铁矿、毒砂和磁黄铁矿中。

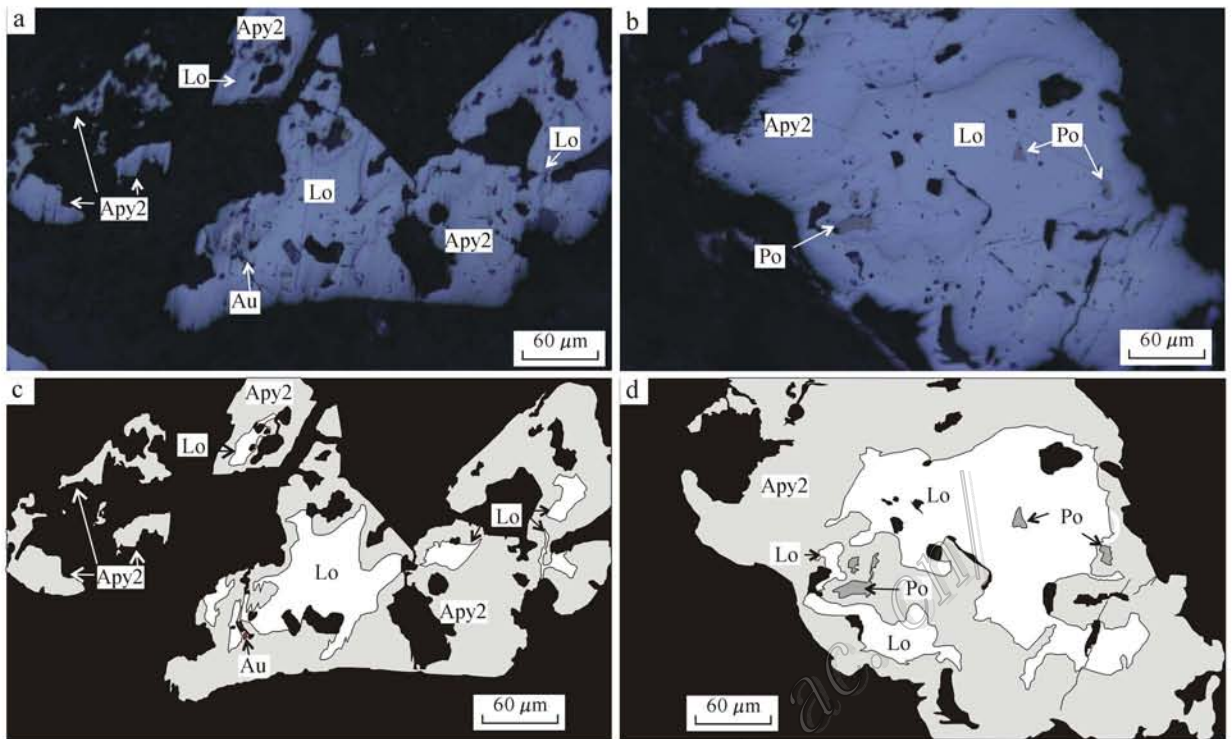


图4 东昆仑水闸东沟-黄龙沟金矿床中斜方砷铁矿(Lo)交代第二世代毒砂(Apy2)显微镜下照片(a和b)和对应的素描图(c和d)

Au—金; Po—磁黄铁矿

Fig. 4 Microscopic images of löllingite (Lo) that replaced arsenopyrite (Apy2) in the Shuizhadonggou-Huanglonggou gold deposit (a and b) and their schematic representations for highlighting boundary of sulfides (c and d)

Au—Gold; Po—Pyrrhotite

表1 样品简要特征一览表

Table 1 Characteristics of the samples

样品编号	岩性	样品位置
W113-4	蚀变花岗岩矿石	35线, 3555平硐, 北穿脉32m处
W132-1	蚀变花岗岩矿石	89线, 3360平硐, 南穿脉28m处
W128-1	蚀变花岗岩矿石	25线, 3555平硐, 北穿脉30m处
W128-2	蚀变花岗岩矿石	33线, 3555平硐, 北穿脉12m处
W126-3	蚀变板岩	7线, 3555平硐, 北穿脉洞口
W130-4	蚀变花岗岩	15线, 3595平硐西北壁

4 讨论

4.1 金富集的阶段性与成矿期成矿阶段

系统的野外地质调查、矿相学观察和电子探针测试结果表明,水闸东沟-黄龙沟金矿床金的富集具有明显的阶段性。

在早期黄铁矿中可探测到金,显示金明显富集的特征。该世代黄铁矿形成最早,其环带由明显重结晶的胶体物质组成,并被热液期流体交代,属于沉积成因,与后期热液成因的黄铁矿明显不同(任云生

等,2006)。由于样品取自赋矿的新元古代中-晚期浅海相丘吉东沟组火山-沉积岩附近,因此,推测该世代黄铁矿是新元古代中-晚期沉积的产物,进而反映新元古代中-晚期丘吉东沟组赋矿沉积-火山岩在成岩过程中初步富集了一定含量的金。

大量斜方砷铁矿、毒砂和磁黄铁矿为主要含金硫化物,是水闸东沟-黄龙沟金矿床金的主要成矿阶段。该地区大规模的岩浆活动时限为早古生代,矿体大多位于早古生代灰白色中粒正长花岗岩中,前人也报道了早古生代的矿化年龄(439~418 Ma)和剪切带构造活动年龄(439~399 Ma)(赵财胜,2004)。最重要的是,邻区金水口群变质岩达到了麻粒岩相,完全具备在前进变质或退变质过程中成矿所需的条件(Tomkins et al., 2009),而且变质时代为早古生代(余能,2005),因此,水闸东沟-黄龙沟金矿床主成矿期应该与早古生代的岩浆-构造事件相关联。

晚期的石英-黄铁矿细脉显示金的富集,该期细

表 2 硫化物电子探针测试结果
Table 2 Electron probe analysis of sulfides

样品号	硫化物	结构	ε(B)%									总和*
			Te	As	S	Co	Ag	Ni	Zn	Fe	Au	
W1 13-4	Lo	Lo 交代 Apy2	-	67.44	3.29	0.07	-	0.31	-	28.14	-	99.25
	Lo	Lo 交代 Apy2	-	67.79	3.33	0.09	-	0.26	0.04	28.02	0.013	99.54
	Apy2	Lo 交代 Apy2	-	48.50	16.91	0.12	-	0.22	0.03	34.91	-	100.69
	Apy2	Lo 交代 Apy2	-	48.48	17.54	0.07	0.01	0.21	-	32.94	-	99.25
	Po	位于 Lo 中, Lo 交代 Apy2	0.06	0.10	38.39	0.06	0.01	-	-	58.77	0.019	97.40
	Po	位于 Apy 中, Lo 交代 Apy2	-	0.14	38.26	0.07	-	-	0.04	59.33	-	97.84
W1 32-1	Py1	环带核部中心	-	0.88	50.89	0.07	-	0.05	0.02	46.18	0.001	98.10
	Py1	环带核部边缘	-	1.00	51.36	0.03	-	0.08	-	46.69	-	99.16
	Po	Po 交代环带状 Py1	0.03	-	39.63	0.04	0.00	0.05	-	60.27	0.008	100.03
W1 28-1	Apy1	Apy1 交代 Po	0.04	41.74	22.09	0.02	-	1.76	-	35.22	-	100.87
	Apy1	Apy1 交代 Po	0.02	40.99	22.34	0.02	-	0.11	0.06	37.03	-	100.57
	Po	Apy1 交代 Po	-	0.00	39.67	0.05	0.02	0.08	-	59.15	-	98.97
	Po	Apy1 交代 Po	-	0.00	39.48	0.04	-	0.14	-	59.68	0.004	99.34
	Apy1	Apy1 交代 Po	-	40.61	22.76	0.04	-	-	0.02	36.06	0.031	99.52
	Apy1	Apy1 交代 Po	-	42.15	22.18	0.15	-	0.07	-	35.27	-	99.82
	Po	Apy1 交代 Po	0.03	0.02	39.34	0.06	-	0.06	-	60.38	-	99.90
	Po	Apy1 交代 Po	-	0.01	39.58	0.04	-	0.04	0.04	59.51	-	99.22
W1 28-2	Py2	Py2 交代 Po	0.04	-	53.71	0.06	-	0.03	-	46.09	-	99.93
	Po	Py2 交代 Po	-	0.04	39.48	0.07	0.01	0.02	0.01	58.18	-	97.81
	Apy2	Lo 交代 Apy2	-	46.02	18.65	0.09	0.00	0.37	-	33.66	0.003	98.79
	Apy2	Lo 交代 Apy2	-	45.88	18.53	0.09	-	0.18	0.13	34.97	-	99.78
	Lo	Lo 交代 Apy2	-	70.05	1.16	0.14	-	0.44	0.02	27.47	0.005	99.29
	Lo	Lo 交代 Apy2	-	70.00	1.30	0.15	-	0.45	-	27.86	0.091	99.85
	Po	位于 Lo 中, Lo 交代 Apy2	-	0.12	37.75	0.07	0.03	-	0.04	61.11	-	99.12
	Po	位于 Apy 中, Lo 交代 Apy2	0.02	0.14	39.16	0.06	0.04	-	0.02	60.80	-	100.24
	Lo	Lo 交代 Apy2	-	71.49	1.59	0.12	-	0.29	0.06	28.06	-	101.61
	Lo	Lo 交代 Apy2	-	71.02	1.67	0.13	0.01	0.38	0.01	27.76	0.020	101.00
	Apy2	Lo 交代 Apy2	-	47.27	18.44	0.12	0.03	0.53	-	33.47	-	99.86
	Apy2	Lo 交代 Apy2	0.01	46.83	19.04	0.14	-	0.32	0.01	33.26	0.058	99.66
W1 26-3	Sph	Sph 交代 Apy1	0.01	-	34.10	0.03	-	-	56.10	10.09	0.001	100.33
	Apy1	Sph 交代 Apy1	-	42.86	21.71	0.05	-	0.00	0.34	35.31	-	100.27
	Sph	Sph 交代 Apy1	0.04	0.01	33.89	0.05	-	0.04	55.20	10.14	-	99.37
	Apy1	Sph 交代 Apy1	0.04	43.45	20.82	0.03	0.02	0.02	0.62	34.41	0.074	99.46
W1 13-4	Au	位于 Apy 中, Lo 交代 Apy2	-	3.53	1.08	-	8.15	-	0.07	3.27	89.206	105.31
	Apy2	Lo 交代 Apy2	-	48.06	17.97	0.08	-	0.04	-	32.87	-	99.02
	Apy2	Lo 交代 Apy2	0.01	46.49	18.47	0.07	-	-	-	34.90	0.286	100.23
	Lo	Lo 交代 Apy2	-	67.56	2.91	0.05	0.04	0.04	0.04	30.00	0.002	100.64
	Py2	中期第一世代	-	0.25	53.83	0.05	-	0.01	0.03	44.89	-	99.06
W1 30-4	Mcs	表生期	-	0.01	53.34	0.04	0.00	-	-	45.39	-	98.78
	Py2	中期第一世代	0.02	-	53.24	0.03	-	-	-	47.12	-	100.41
	Apy3	第三世代	-	44.84	20.12	0.18	0.02	0.04	0.01	35.12	-	100.33
	Py2	中期第一世代	0.02	-	53.12	0.10	0.03	0.30	-	45.44	-	99.01
W1 30-4	Mcs	表生期	0.03	-	53.38	0.06	-	0.32	0.06	47.02	-	100.87
	Sph		-	0.02	33.63	0.02	-	-	56.58	9.81	-	100.06
	Py4	晚期	0.04	0.03	53.04	0.08	-	-	0.77	46.17	0.008	100.14
	Py4	晚期	-	0.01	53.01	0.05	0.01	-	0.81	46.81	0.003	100.70
	Sph		-	-	33.63	0.03	-	0.05	57.31	8.86	-	99.88
	Sph		-	-	34.09	-	-	0.01	56.06	10.20	0.023	100.38
	Mcs	表生期	-	-	52.97	0.04	-	0.18	0.33	45.60	-	99.12

注：Apy—毒砂，Au—可见金，Lo—斜方砷铁矿，Mcs—白铁矿，Po—磁黄铁矿，Py—黄铁矿，Sph—闪锌矿。“-”表示低于检测限。* 总和为四舍五入结果。

脉宽度仅数微米,分布局限,一旦出现则分布密集。该区存在少量的早中生代岩浆活动,五龙沟矿区蚀变的绢云母也给出了早中生代的年龄(237~239 Ma,张德全等,2005),同时伴随着早中生代的剪切构造活动(240~217 Ma,赵财胜,2004),说明早中生代也是该金矿床金的富集阶段。

综合野外地质调查、矿相学观察和电子探针结果,该矿床可划分出4个成矿期:沉积期、热液Ⅰ期、热液Ⅱ期以及表生期。沉积期为金的初步富集期,以胶状物质形成的环带状黄铁矿和筛状黄铁矿为代表。热液Ⅰ期包括磁黄铁矿-毒砂-斜方砷铁矿-自然金(Po-Apy-Lo-Au)阶段、石英-粗粒黄铁矿(Q-Py2)

阶段、石英-方铅矿-闪锌矿-萤石(Q-Gn-Sph-Fl)阶段及方解石-黄铁矿(Cc-Py3)阶段,其中,磁黄铁矿-毒砂-斜方砷铁矿-自然金阶段矿物生成顺序从早到晚为磁黄铁矿、毒砂、斜方砷铁矿和可见金,是金的主成矿阶段。热液Ⅱ期主要由石英-黄铁矿(Q-Py4)细脉组成,金再次富集成矿,但规模较小。表生期以白铁矿出现为特征,前人还观察到臭葱石和褐铁矿(刘增铁等,2005),代表矿体暴露地表后的变化。

4.2 可见金形成条件分析

不可见金通常有晶格金和纳米级金颗粒2种形式。水闸东沟-黄龙沟金矿床中观察到微米级金颗粒,说明存在可见金,电子探针测试在部分斜方砷铁

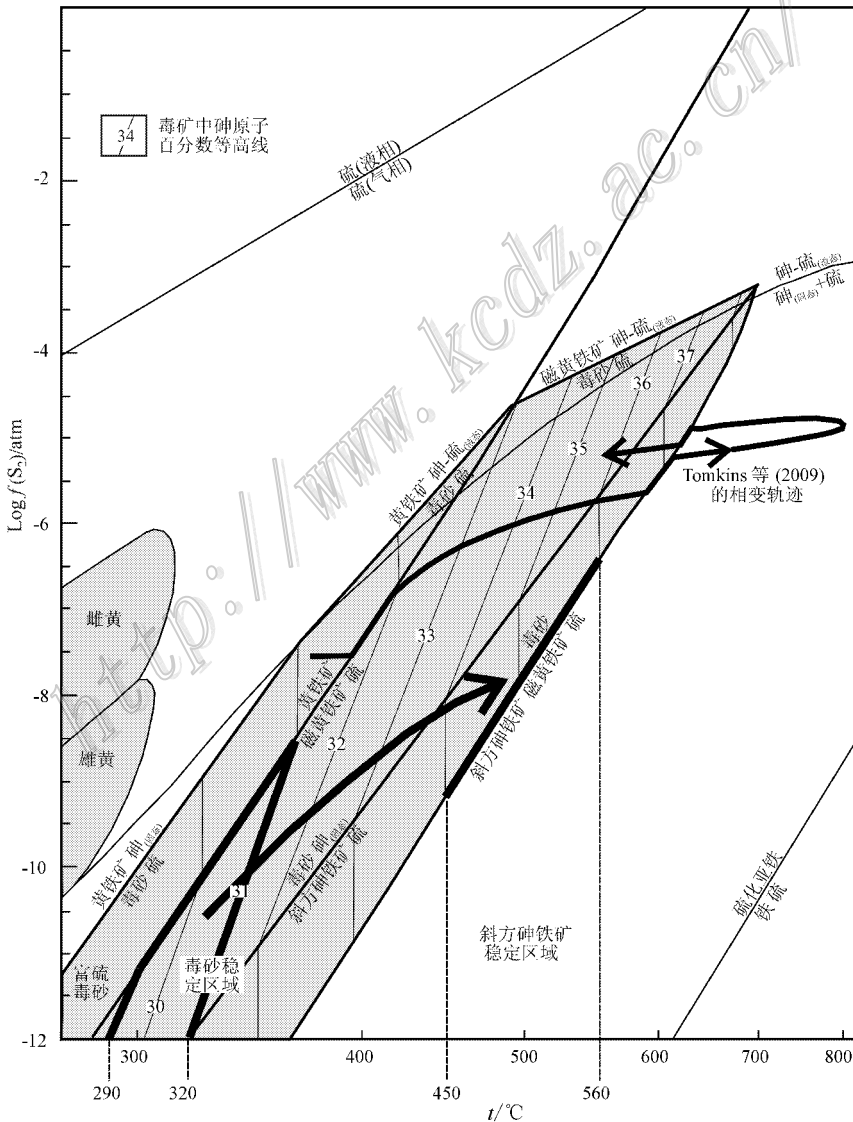


图5 黄铁矿-毒砂-磁黄铁矿-斜方砷铁矿相图(据 Tomkins et al., 2009)

Fig. 5 Phase relationships of pyrite-arsenopyrite-pyrrhoite-löllingite(after Tomkins et al., 2009)

矿、毒砂、磁黄铁矿和黄铁矿中探测到金的存在,说明也存在不可见金。本次工作还无法区分晶格金及纳米级金颗粒。在磁黄铁矿-毒砂-斜方砷铁矿-自然金(Po-Apy-Lo-Au)阶段,可见金形成时间明显晚于其他矿物,由于可见金多是由分布于载金矿物中的不可见金重新富集的结果,因此,分布在这些矿物中的不可见金(特别是晶格金)的形成时间要早于可见金,故金由不可见金向可见金转变,转换的条件是值得关注的问题,金属硫化物的结构可以为解决这一问题提供可靠的证据。

Tomkins等(2009)认为,在前进变质作用过程中,含金毒砂分解后会形成斜方砷铁矿+磁黄铁矿,同时金进入斜方砷铁矿晶格,在随后的退变质作用阶段,斜方砷铁矿转变为毒砂,使不可见金向斜方砷铁矿中心扩散,由于高温时金不能进入毒砂晶格,当斜方砷铁矿中心晶格中的金饱和时,不可见金会析出成可见金的形态,并且分布在斜方砷铁矿与毒砂的边界(图5)。本次研究的磁黄铁矿-毒砂-斜方砷铁矿-自然金(Po-Apy-Lo-Au)阶段,由矿物之间的交代关系得出矿物的生成顺序从早到晚为磁黄铁矿、毒砂、斜方砷铁矿和金,在该阶段可以观察到2个世代的毒砂,第一世代毒砂砷原子百分数在29%~31%之间,第二世代毒砂被斜方砷铁矿交代,其砷原子百分数在34%~36%之间。由于该阶段矿物组合位于磁黄铁矿稳定区域,按照Fe-As-S矿物相图和毒砂中砷的原子百分数,第一世代毒砂形成的温度为290~320℃,第二世代毒砂和斜方砷铁矿形成的温度为450~560℃(图5),由早至晚体系温度升高,硫逸度也明显升高,代表前进变质作用。斜方砷铁矿交代毒砂的结构中往往可以观察到可见金,说明可见金形成的温度范围为450~560℃,相当于绿片岩相的上限。薄片观察表明,主要蚀变矿物为绢云母和绿泥石,缺少黑云母,与上述温度范围基本一致。

需要说明的是,与Tomkins等(2001;2006;2009)的工作相比,本次研究在斜方砷铁矿与毒砂颗粒交界处并未找到群集分布的可见金颗粒,而密集分布的可见金颗粒与达到麻粒岩相变质后的退变质作用密切相关,说明研究区变质作用可能仅达到绿片岩相的上限,没有达到麻粒岩相,这与观察到的硅酸盐矿物组合一致,也与观察不到明显的毒砂交代斜方砷铁矿这一典型代表退变质结构相一致。

5 结 论

(1)综合野外特征、矿相学观察和电子探针测试结果,水闸东沟-黄龙沟金矿床可划分出4个成矿期:沉积期、热液Ⅰ期、热液Ⅱ期以及表生期。新元古代沉积期属金的初步富集期,早古生代热液Ⅰ期是金的主成矿期,早中生代热液Ⅱ期金再次活化富集,表生期代表矿体暴露地表后的变化。

(2)热液Ⅰ期的磁黄铁矿-毒砂-斜方砷铁矿-自然金(Po-Apy-Lo-Au)阶段,由早至晚体系温度和硫逸度升高,代表前进变质作用,变质条件达绿片岩相上限。斜方砷铁矿交代毒砂的结构中往往可以观察到可见金,说明可见金形成于绿片岩相上限的温度范围内,该结论得到蚀变矿物组合为绢云母和绿泥石的支持。

志 谢 野外调查期间得到青海省第一地质矿产勘查院张延林副院长和其同事的积极配合,电子探针测试得到南京大学张文兰教授级高级工程师的热情帮助,在此表示真诚的感谢。

参考文献/References

- 陈有炳,裴先治,李瑞保,刘战庆,李佐臣,张晓飞,陈国超,刘智刚,丁仁平,郭俊锋. 2011. 东昆仑造山带东段元古界小庙岩组的锆石 U-Pb 年龄[J]. 现代地质, 25(3): 510-521.
- 丰成友,张德全,李大新,余宏全. 2003. 青海东昆仑造山型金矿硫、铅同位素地球化学[J]. 地球学报, 24(6): 593-598.
- 李厚民,沈远超,胡正国,钱壮志. 2001a. 青海省东昆仑五龙沟地区金矿成矿条件及成矿机理[J]. 地质与勘探, 37(1): 65-69.
- 李厚民,沈远超,胡正国,汤红云,钱壮志,刘继庆,孙继东. 2001b. 青海五龙沟金矿床矿石、矿物含金性及金的赋存状态[J]. 矿物学报, 21(1): 89-94.
- 刘增铁,任家琪,杨永征. 2005. 青海金矿[M]. 北京:地质出版社. 181-211.
- 陆 露. 2011. 东昆仑五龙沟金矿构造控矿特征研究(硕士论文)[D]. 导师:吴珍汉. 北京:中国地质科学院. 1-88.
- 钱壮志,胡正国,刘继庆,李厚民,孙继东,苏春乾,张心广. 1999. 石灰沟韧性剪切带构造变形特征及其研究意义[J]. 青海地质, 8(1): 23-29.
- 任云生,刘连登. 2006. 铜陵地区热液成因胶状黄铁矿及其成矿意义[J]. 矿床地质, 25(S1): 95-98.
- 余 能. 2005. 东昆仑金水口变质岩系及其流体包裹体特征(硕

- 位论文[D]. 导师:金巍. 吉林:吉林大学. 1-57.
- 张德全,党兴彦,余宏全,李大新,丰成友,李进文. 2005. 柴北缘-东昆仑地区造山型金矿床的 Ar-Ar 测年及其地质意义[J]. 矿床地质, 24(2):87-98.
- 张延林,韩玉,张培青,田承盛,陈建林. 2011. 东昆仑五龙沟金矿床Ⅺ号金矿化带特征及找矿前景[J]. 黄金, 32(9):9-15.
- 赵财胜. 2004. 青海东昆仑造山带金、银成矿作用(博士学位论文)[D]. 导师:姚凤良,孙丰月. 吉林:吉林大学. 1-129.
- Bi S J, Li J W, Zhou M F and Li Z K. 2011. Gold distribution in As-deficient pyrite and telluride mineralogy of the Yangzhaiyu gold deposit, Xiaqingling district, southern North China craton[J]. Mineralium Deposita, 46(8):925-941.
- Cook N J, Ciobanu C L and Mao J W. 2009. Textural control on gold distribution in As-free pyrite from the Dongping, Huangtuliang and Hougou gold deposits, North China craton(Hebei Province, China)[J]. Chemical Geology, 264(1):101-121.
- Hayashi K and Ohmoto H. 1991. Solubility of gold in NaCl-bearing and H₂S-bearing aqueous-solutions at 250-350°C[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55(8):2111-2126.
- Large R R, Bull S W and Maslennikov V V. 2011. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits[J]. Econ. Geol., 106(3):331-358.
- Large R R, Danyushevsky L, Hollit C, Maslennikov V, Meffre S, Gilbert S, Bull S, Scott R, Emsbo P, Thomas H, Singh B and Foster J. 2009. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: Implications for the timing of gold in Orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits[J]. Econ. Geol., 104(5):635-668.
- Large R R, Maslennikov V V, Robert F, Danyushevsky L V and Chang Z S. 2007. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia[J]. Econ. Geol., 102(7):1233-1267.
- Mikucki E J. 1998. Hydrothermal transport and depositional processes in Archean lode-gold systems: A review[J]. Ore Geology Reviews, 13(1-5):307-321.
- Morey A A, Tomkins A G, Bierlein F P, Weinberg R F and Davidson G J. 2008. Bimodal distribution of gold in pyrite and arsenopyrite: Examples from the Archean Boorara and Bardoc shear systems, Yilgarn craton, Western Australia[J]. Econ. Geol., 103(3):599-614.
- Su W C, Xia B, Zhang H T, Zhang X C and Hu R Z. 2008. Visible gold in arsenian pyrite at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: Implications for the environment and processes of ore formation[J]. Ore Geology Reviews, 33(3-4):667-679.
- Tomkins A G and Grundy C. 2009. Upper temperature limits of orogenic gold deposit formation: Constraints from the granulite-hosted Griffin's Find deposit, Yilgarn craton[J]. Econ. Geol., 104(5):669-685.
- Tomkins A G and Mavrogenes J A. 2001. Redistribution of gold within arsenopyrite and lollingite during pro- and retrograde metamorphism: Application to timing of mineralization[J]. Econ. Geol., 96(3):525-534.
- Tomkins A G, Frost B R and Pattison D R M. 2006. Arsenopyrite melting during metamorphism of sulfide ore deposit[J]. The Canadian Mineralogist, 44(5):1045-1062.