

文章编号: 0258-7106(2013)02-0436-17

冀东峪耳崖金矿床金属矿物特征及其组合意义*

孔德鑫¹, 尹京武^{1*}, 胡建中¹, 李 娇¹, 郭 媛¹, 杨海涛¹, 邵兴坤¹,
胡 兵², 田录军²

(1 中国地质大学科学研究院, 北京 100083; 2 中国黄金集团峪耳崖镇黄金矿业有限责任公司, 河北 峪耳崖镇 067601)

摘 要 峪耳崖金矿床是冀东地区重要的金矿床之一。研究峪耳崖金矿床中金属矿物成分的变化及元素赋存状态, 对了解矿床的形成机制及指导找矿具有重要意义。本次工作应用光学显微镜和电子探针(EPMA)对峪耳崖金矿床中的金属矿物进行了研究, 并应用氢、氧及硫同位素分析对峪耳崖金矿床的成矿热液来源及硫源进行了探讨。该矿床的载金矿物有石英、黄铁矿、碲铋矿, 金矿物为银金矿。其中, 黄铁矿的 $\alpha(\text{S})$ 平均为52.34%, 与理论值相比, 其普遍亏硫, 显示出成矿与热液有关。碲铋矿是本次工作重点研究的载金矿物, 与金的产出具关联性。被碲铋矿包裹的银金矿的 $\alpha(\text{Au})$ 要高于被黄铁矿包裹的银金矿的 $\alpha(\text{Au})$ 。据氢、氧及硫同位素测试结果认为, 峪耳崖金矿床的热液来源主要为岩浆水, 硫来自深部岩浆源。结合黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、碲铋矿和银金矿等的矿物学特征及组合意义推断, 峪耳崖金矿床为中-深成中温岩浆热液矿床, 并认为其深部找矿可关注Te、Bi富集异常的区段。

关键词 地质学 矿物学特征 金属矿物 碲铋矿 银金矿 峪耳崖 冀东

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Mineralogical characteristics of metallic minerals in Yuerya gold deposit of eastern Hebei Province and their combination significance

KONG DeXin¹, YIN JingWu¹, HU JianZhong, LI Jiao¹, GUO Yuan¹, YANG HaiTao¹,
SHAO XingKun¹, HU Bing² and TIAN LuJun²

(1 Institute of Earth Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2 Yuerya Gold Mining Co., Ltd., China National Gold Group, Yuerya 067601, Hebei, China)

Abstract

The Yuerya gold deposit is one of the important gold deposits in eastern Hebei Province. The study of the compositional variations of metallic minerals and the mode of occurrence of elements from the Yuerya gold deposit is of great significance in further understanding the metallogenic mechanism and providing the basis for further prospecting. The research on metallic minerals of the Yuerya gold deposit was carried out by means of field survey and microscopic study as well as the Electron Probe Micro Analysis (EPMA). Hydrogen, oxygen and sulfur isotopes were also analyzed to probe into the sources of ore-forming hydrothermal fluids and sulfur. The gold-bearing minerals of the Yuerya gold deposit include quartz, pyrite and tellurobismuthite, and the gold mineral is electrum. The sulfur average content of pyrite is 52.34 wt%. A comparison with the theoretical content of sulfur shows that the pyrite from Yuerya gold deposit is generally sulfur depletion, suggesting that the mineralization of deposit was related to the hydrothermal fluid. This study laid emphasis on the gold-bearing

* 本文得到“冀东北地区金矿床成矿规律总结研究”项目(编号 20089936)的资助

第一作者简介 孔德鑫,男,1986年生,硕士研究生,矿床学与矿床地球化学专业。Email: xinhorizon123@163.com

** 通讯作者 尹京武,男,1958年生,副教授,现主要从事矿床学与矿床地球化学等方面的研究。Email: yinjwt@cugb.edu.cn

收稿日期 2012-04-13; 改回日期 2012-12-14。许德煊编辑。

mineral tellurobismuthite which belonged to the medium and high temperature mineral and had certain genetic relationship with the formation of electrum. Based on a comparison between the amount of gold carried by electrum in pyrite and that in tellurobismuthite, the authors have come to the conclusion that the amount of gold carried by tellurobismuthite was greater than the amount of gold carried by pyrite. By analyzing hydrogen, oxygen and sulfur isotope, the authors consider that the ore-forming fluid came from magmatic water, and the sulfur came from deep-seated magma. Taking the mineralogical characteristics and combination significance of pyrite, chalcopyrite, sphalerite, galena, tellurobismuthite and electrum into account, the authors hold that the Yuerya gold deposit belongs to middle-deep medium temperature magmatic hydrothermal deposit, and that we should pay special attention to the enrichment area of Te and Bi in the prospecting for deep ore bodies.

Key words: geology, mineralogical characteristics, metallic mineral, tellurobismuthite, electrum, Yuerya area, eastern Hebei Province

峪耳崖金矿床位于河北省宽城县境内,是该省重要的金矿床之一,产在燕山造山带内喜峰口-下板城构造-岩浆活动带中。该构造-岩浆带由数条 NEE 向-NE 向区域性大断裂及沿断裂带分布的岩浆侵入体组成,其基底由太古界片麻杂岩和中-新元古界巨厚沉积岩系组成(张秋生等,1991)。前人对该金矿床的成矿物质来源、成矿时代、矿床成因、矿体赋存规律等做过很多研究工作。邱检生等(1994)认为,峪耳崖金矿床的矿化与中生代花岗岩有关,成矿物质和成矿热液来自岩浆体系;曲以秀等(1995)认为,该矿床与燕山期花岗岩为同源产物;王自力等(2008)则认为,该矿床的成矿物质主要来自地核,随地幔热柱多级演化向地表迁移,在上升过程中与壳源物质发生部分混染。罗镇宽等(2001)认为,该矿床的金矿化发生在燕山中期以后;汤云晖等(2003)认为其成矿时代为 115~200 Ma,成矿的三个高峰期与当时中国东部大规模成矿期吻合。在矿床成因方面,牛树银等(2000)认为,峪耳崖金矿床是受冀东幔枝构造(相当于俗称的“马兰峪复背斜”)外围主拆离带控制的盖层金矿;张秋生等(1991)、柴社立(1989)、赵海玲等(1997)认为,该矿床是典型的岩浆热液矿床。

本次工作的重点是研究峪耳崖金矿床金属矿物的矿物学特征,以期提供出有关矿床成因的矿物学证据,并为峪耳崖金矿床的后续找矿工作提供参考。

1 地质概况

1.1 区域地质

冀东地区的地壳经历了陆核孕育、陆块形成、陆

块发展和滨太平洋边缘活动等地质演化阶段,具备了对形成矿产极为有利的地质环境。

该地区的太古界为一套深变质岩系,包括迁西群和八道河群,其岩性主要为斜长片麻岩、角闪斜长二辉麻粒岩、斜长角闪岩等。中、新元古界包括青白口系、蓟县系和长城系,岩性主要为石英砂岩、页岩、泥质白云岩等(张秋生等,1991)。

该地区位于中朝准地台燕山台褶带的东段。区内褶皱和断裂极为发育,断裂构造有近 EW 向的喜峰口-凌源断裂带、NW 向的冷口断裂带等(图 1)。

冀东地区岩浆活动强烈,在燕山期达到顶峰,以岩浆侵入为主。区内出露的花岗岩体主要有峪耳崖、牛心山、贾家山、都山、青山口、肖营子等岩体,主要岩石类型有钾长花岗岩、黑云母花岗岩、花岗闪长岩、二长花岗岩等(图 1)具有多期次活动的特点(牛树银等 2000;陈斌 2009;任广智等 2010)。

1.2 矿区地质

峪耳崖金矿区内出露的地层主要为长城系高于庄组白云质灰岩、蓟县系雾迷山组泥质白云岩以及第四系。

该矿区位于马兰峪复式背斜的北缘,其产出受控于 NE 向喜峰口-凌源压扭性区域大断裂带(戚龙水等,1999),致使矿体整体上呈 NE 走向(图 2)。

矿区内的岩浆岩为燕山期峪耳崖复式花岗岩体,由钾长花岗岩和黑云母花岗岩组成。康显桂等(1996)认为,峪耳崖花岗岩是由老基底内的基性火山沉积岩系经重熔而形成;赵海玲等(1998)认为,峪耳崖花岗岩及峪耳崖金矿床的物质来源均为下地壳,金矿的矿源层是由上地幔局部熔融形成的下地壳,经过富集而形成的。目前,对于峪耳崖花岗岩是否与成矿有关的问题尚存争议。戚龙水等(1999)、

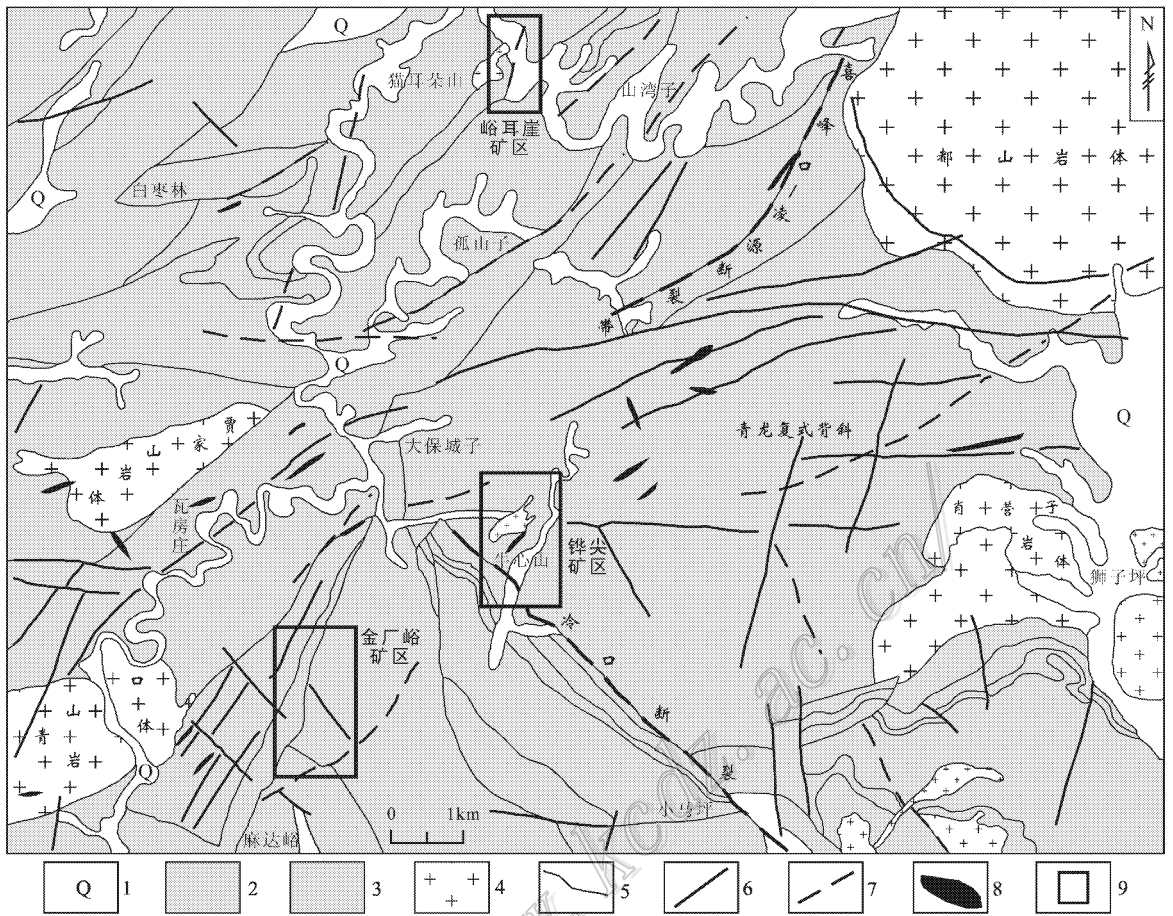


图1 冀东区域地质图(据陈斌, 2009 修编)

1—第四系; 2—太古界变质岩系; 3—中元古界白云质灰岩和灰质白云岩; 4—花岗岩; 5—地质界线; 6—实测断裂; 7—推测断裂; 8—脉岩; 9—矿区范围

Fig. 1 Regional geological map of eastern Hebei Province (modified after Chen 2009)

1—Quaternary; 2—Archean metamorphic rocks; 3—Middle-Proterozoic dolomitic limestone and limy dolomite; 4—Granite; 5—Geological boundary; 6—Measured fault; 7—Inferred fault; 8—Vein rock; 9—Ore district

张景合等(2000)认为, 峪耳崖金矿床的形成与花岗岩有着密切的关系; 罗镇宽等(2001)认为, 峪耳崖岩体是燕山期的产物, 说明金矿化发生在燕山中期后, 但由于在花岗岩侵入后及金矿化之前还有脉岩侵入, 因此认为, 金矿化与花岗岩本身无直接联系。

峪耳崖矿区以洒金沟和西沟为大致分界线, 划分为南矿带、中矿带和北矿带(图2)。矿区内矿脉众多, 已查明的有148条, 其中的96条为盲矿脉。据统计, 这些金矿脉有98%以上产于峪耳崖花岗岩体中(任广智等, 2010), 仅有少数矿脉延伸到灰岩中的断裂、裂隙内, 沿破碎带尖灭, 形成不规则条带状、豆荚状、透镜体状、串珠状矿体, 具有分支复合、膨大收缩现象。近矿围岩蚀变有硅化、绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿化等。

2 矿化类型与特征

峪耳崖矿区的金矿化类型为含金硫化物石英脉型。井下观察发现, 石英脉可分为2种, 即烟灰色及乳白色石英脉(图3), 在井下并未发现这2种石英脉有穿插现象。烟灰色石英脉因含有较多的硫化物和尘埃状不透明金属矿物, 故整体上显示呈烟灰色, 含金概率较高(雷书浩, 1991; 廖香俊等, 1998; 吴丹等, 1998)。

矿石结构有自形-半自形粒状结构、他形粒状结构等; 矿石构造为细脉状构造、条带状构造。金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼矿、碲铋矿、金银矿、银金矿等; 非金属矿物有石英、黑云

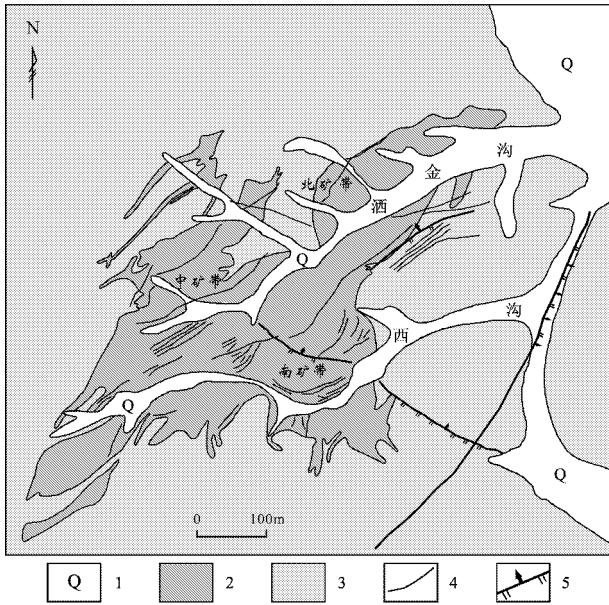


图 2 峪耳崖金矿区地质图(据峪耳崖金山, 2006 修编)
1—第四系; 2—燕山期花岗岩; 3—长城系高于庄组灰质白云岩及白云质灰岩; 4—矿体; 5—断裂

Fig. 2 Geological map of the Yuerya gold ore district (modified after Exploration Report of the Yuerya Gold Deposit)
1—Quaternary; 2—Yanshanian granite; 3—Gaoyuzhuang Formation limy dolomitite and dolomitic limestone of Changcheng System; 4—Ore body; 5—Fault

母、白云母、绢云母、绿泥石、钠长石、钾长石、菱铁矿、白钨矿、方解石、重晶石、白云石、磷灰石、萤石等。

依据井下调查及矿相显微镜观察,结合前人研究成果(戚龙水等,1999;李颖等,1999),将峪耳崖金矿床的成矿过程划分为 4 个矿化阶段:①石英-中粗粒黄铁矿矿化阶段;②石英-细粒黄铁矿-碲铋矿-金矿化阶段;③石英-多金属硫化物-碲铋矿-金矿化阶段;④石英-黄铁矿-方解石矿化阶段。金矿化主要在第 2 和第 3 阶段产出。

3 金属矿物特征及其组合意义

黄铁矿 峪耳崖金矿床中的黄铁矿为淡黄色反射色,表面有麻点,是主要的载金矿物,在成矿期的各个阶段均有出现。早期的黄铁矿粒径较大,晶形以立方体为主,多为自形晶,具有明显的压碎结构,并有棱角状碎粒集合体,金含量不高。后期的黄铁矿呈半自形-他形,晶形以五角十二面体和菱形十二面体为主,与黄铜矿等共生(图 4A)或被闪锌矿交代

而呈交代溶蚀结构,含金量较高。黄铁矿中包裹有主要呈显微包体形式的银金矿。

黄铜矿 主要富集于石英-多金属硫化物-碲铋矿-金矿化阶段。该阶段内较早形成的黄铜矿多为半自形-他形,呈脉状充填共生于黄铁矿裂隙中(图 4A)或被黄铁矿包裹。也可见到黄铜矿以乳滴状固溶体出溶物分布在闪锌矿中(图 4B),表明随着温度的降低,由原含矿流体形成的多金属固溶体发生了溶离,局部表现为黄铜矿呈乳滴状沿闪锌矿的定向裂隙分布而构成两者的溶离交生。较晚形成的黄铜矿则被方解石或白云石包裹。

闪锌矿 为均质体矿物,具灰色微带褐色反射色(图 4B),多呈他形粒状集合体。与闪锌矿共生的矿物为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、方解石等,未见毒砂、磁黄铁矿等,说明其形成温度不高,推测为中温(王濮等,1982)。可交代黄铁矿,或包含较小的黄铁矿颗粒而呈包含结构,或呈粒状浸染于黄铜矿中。

方铅矿 为不规则粒状,多呈他形晶集合体,交代黄铁矿呈港湾状,或被闪锌矿交代而呈交代残余结构。与碲铋矿共生(图 4C),富集于石英-多金属硫化物-碲铋矿-金矿化阶段,与金矿化关系密切(图 5F)。从图 5F 可见,方铅矿呈半自形-他形粒状,在其边部包裹有与其共生的银金矿颗粒。由图 5I 和图 5J 可见,Pb 元素的分布密集程度要高于 S,从方铅矿的核部到边部 S 和 Pb 的分布密集程度无明显变化。

碲铋矿 为中-高温矿物(卢静文等,2010),是本次工作重点研究的载金矿物。峪耳崖金矿床内的碲铋矿具有白色微带浅红色的反射色,粒径为 $15 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 到 $45 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$,大部分呈他形粒状,少数为半自形-自形,主要产于烟灰色石英脉中,多与方铅矿共生,亦见包裹方铅矿(图 4C)。碲铋矿与银金矿的交界线平直且圆滑,显示出与银金矿的密切共生关系。由图 4D 可见,碲铋矿包裹银金矿,以及银金矿在碲铋矿边部与其呈嵌生关系。从图 5D 和图 5E 可以看出,Te 的分布密集程度要高于 Bi。

银金矿 反射色为金黄色,反射率高,表面光滑、干净(图 4C、图 4D),粒度粗细不一(从 $10 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 到 $380 \mu\text{m} \times 270 \mu\text{m}$),呈浑圆状、蠕虫状、港湾状产出。银金矿既可呈独立包体金的形式产出于黄铁矿、石英中,也可与碲铋矿呈包裹和嵌生关系而产于石英中(图 4C、图 4D)。从图 5A 和图 5F 可以看出,与碲铋矿嵌生的银金矿呈半自形-他形,由于其

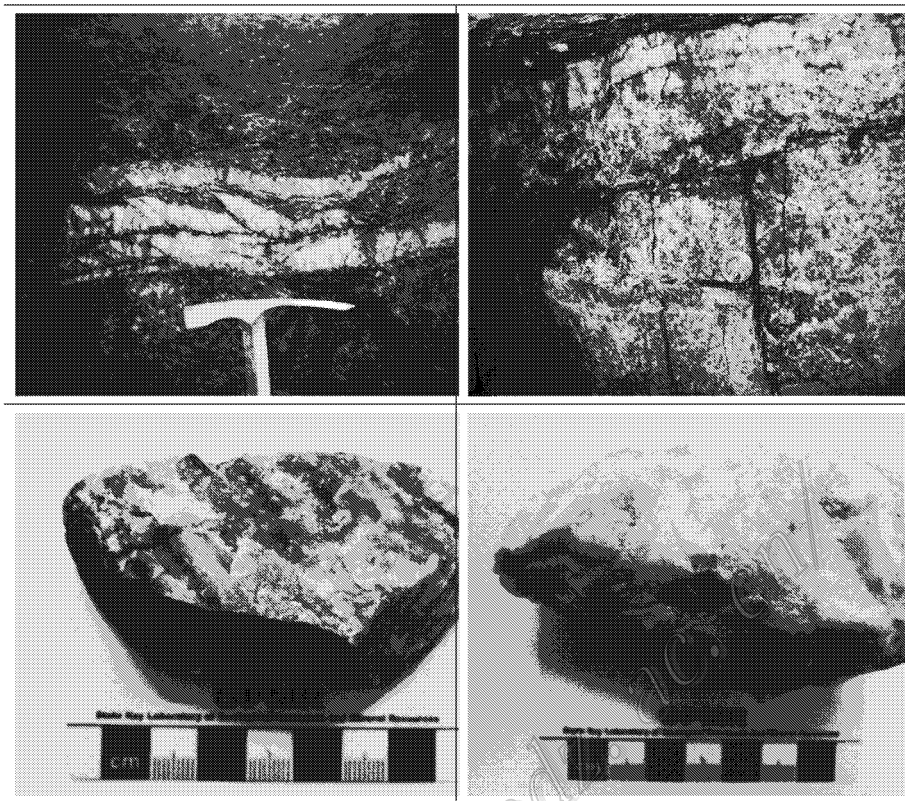


图3 峪耳崖金矿区乳白色石英和烟灰色石英井下照片及标本照片

- A. 乳白色石英脉,井下照片,围岩为花岗岩; B. 烟灰色石英脉,井下照片,围岩为花岗岩; C. 烟灰色石英标本照片;
D. 乳白色石英标本照片

Fig. 3 Photographs of milky quartz veins and ash-gray quartz veins and the hand specimen from the Yuerya gold ore district
A. Milky quartz veins, photograph in the drill hole, country rocks being granite; B. ash-gray quartz veins, photograph in the drill hole, country rocks being granite; C. Hand specimen of ash-gray quartz; D. Hand specimen of milky quartz

平均原子序数较高,因而其亮度比碲铋矿及方铅矿要略高一些。由图5B和图5C以及图5G和图5H可见,银金矿中Ag的分布密集程度要低于Au,从银金矿的核部到边部,Au的分布密集程度变化不大,说明Au的分布较均匀,并不存在含金的细小矿物包体。同时可以看到,只有在银金矿的范围内,分布有显示Au元素的亮点,在其他区域则未见,说明金并不以类质同象的方式进入碲铋矿的晶格。

4 金属矿物化学组成

峪耳崖金矿床金属矿物化学组成的测试由中国地质大学(北京)电子探针实验室完成。测试仪器为EPMA-1600型电子探针;测试条件:加速电压15

kV,束流20 nA,束斑直径 $1\ \mu\text{m}$,测试矿物为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、碲铋矿、银金矿。标准样品为:TiO₂(金红石),MnO(蔷薇辉石),Fe₃O₄(磁铁矿),Fe、Cu、S(黄铜矿),Pb(方铅矿),Sb(辉锑矿),Cd(辉钴矿),Ni(镍黄铁矿),As、Ga(铍砷矿),Cd(纯金属),Se(碲硒化物),Ge(纯金属),Te、Bi(碲铋化物),Zn、Ir(闪锌矿),Ag、Au(银金矿)。

4.1 黄铁矿

黄铁矿的 $w(\text{Fe})$ 为46.23%~47.46%,平均为46.79%; $w(\text{S})$ 为51.42%~52.96%,平均为52.27%(表1)。其Fe含量绝大部分高于理论值(46.55%),而S含量则低于理论值(53.45%),表现出亏硫的特征,表明其形成可能与热液作用有关(梅建明,2000)。

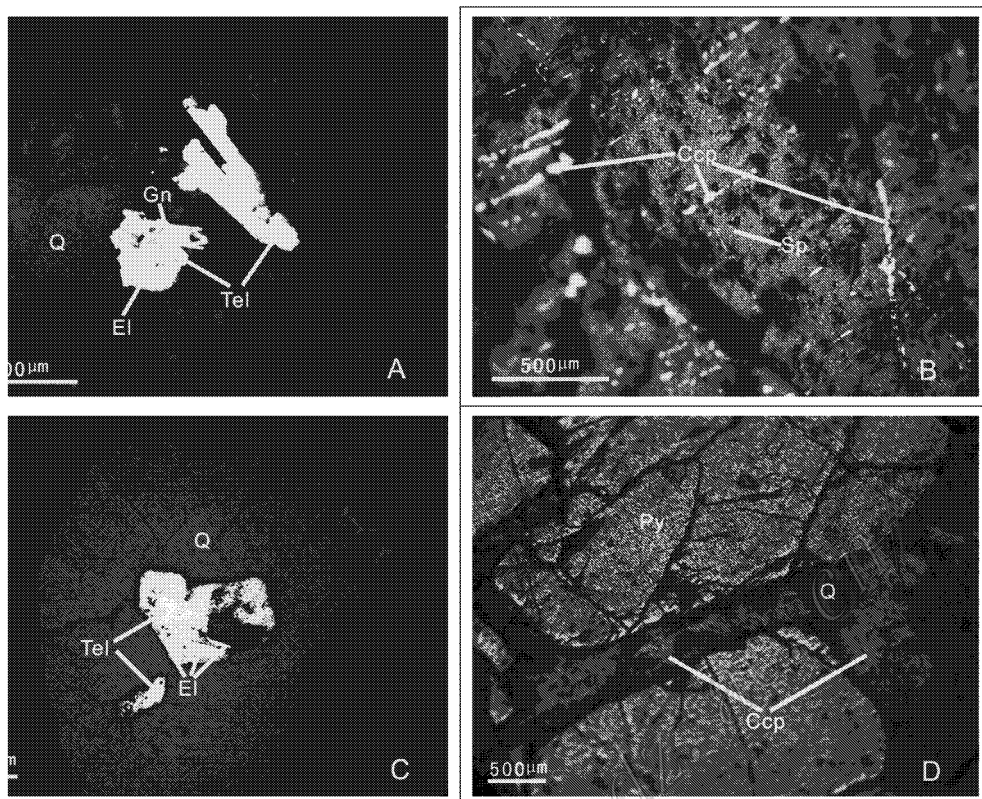


图 4 峪耳崖金矿床金属矿物共生及交代关系

A. 黄铜矿沿黄铁矿裂缝充填,呈共生关系,反射光;B. 黄铜矿在闪锌矿中呈固溶体分离出溶结构,反射光;C. 银金矿与方铅矿、碲铋矿共生,碲铋矿包裹方铅矿,呈半自形-自形,方铅矿为半自形-他形,反射光;D. 银金矿与碲铋矿共生,银金矿为半自形-他形粒状,碲铋矿为半自形-他形粒状,反射光

Fig. 4 Photographs of paragenetic relationship of metallic minerals from the Yuerya gold deposit

A. Chalcopyrite filling pyrite along the fractures, reflective light; B. Sphalerite and chalcopyrite constituting a detachable portion of solid solution, reflective light; C. Electrum intergrown with galena which exists as hypidiomorphic granular-anhedra grains and tellurobismuthite which exists as idiomorphic granular-hypidiomorphic granular texture, reflective light; D. Electrum intergrown with tellurobismuthite, both of which exist as hypidiomorphic granular-allotriomorphic granular texture, reflective light

对比不同矿化阶段黄铁矿的 S 含量可看出,其 S 含量先降低后升高,在第 3 矿化阶段达到最低值,在第 4 矿化阶段升高[$\omega(\text{S})$ 变化趋势为 52.33% → 52.25% → 52.13% → 52.32%]。推测其原因是,在第 2、3 矿化阶段,多种金属硫化物如黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等相继大量沉淀,消耗了成矿流体中较多的 S,造成硫逸度持续降低,可进入黄铁矿晶格的硫相应减少;而在第 4 矿化阶段,金属硫化物仅有少量黄铁矿沉淀,故造成黄铁矿的 S 含量升高。

黄铁矿的 $\omega(\text{As})$ 为 0.01% ~ 0.69%, 平均为 0.23%。对比不同矿化阶段黄铁矿的 As 含量可见,其具有先升高后降低的趋势[$\omega(\text{As})$ 变化趋势为 0.22% → 0.45% → 0.09% → 0.27%], 在第 2 矿化阶

段达到最高,在第 3 矿化阶段降到最低,在第 4 矿化阶段又升高。As 在黄铁矿中会替代 S 的位置,导致晶胞参数增大,化学键联结能力减弱,晶格易发生错位而形成晶格缺陷,从而有利于金的赋存(郭福祺, 1988)。这与第 2 矿化阶段 As 含量最高且金产出也最多是一致的。第 3 矿化阶段黄铁矿的 As 含量之所以最低,是因为该阶段的 As 在进入黄铁矿晶格的同时也会以类质同象的形式替代 S 等元素进入黄铜矿、方铅矿的晶格。而在第 4 矿化阶段,金属硫化物仅有少量黄铁矿沉淀,使得具有亲硫性的 As 进入黄铁矿,导致该阶段黄铁矿的 As 含量升高。

黄铁矿的 $\omega(\text{Co})$ 与 $\omega(\text{Ni})$ 之和的变化趋势跟 $\omega(\text{Fe})$ 的变化趋势相反,表明 Co 和 Ni 以类质同象

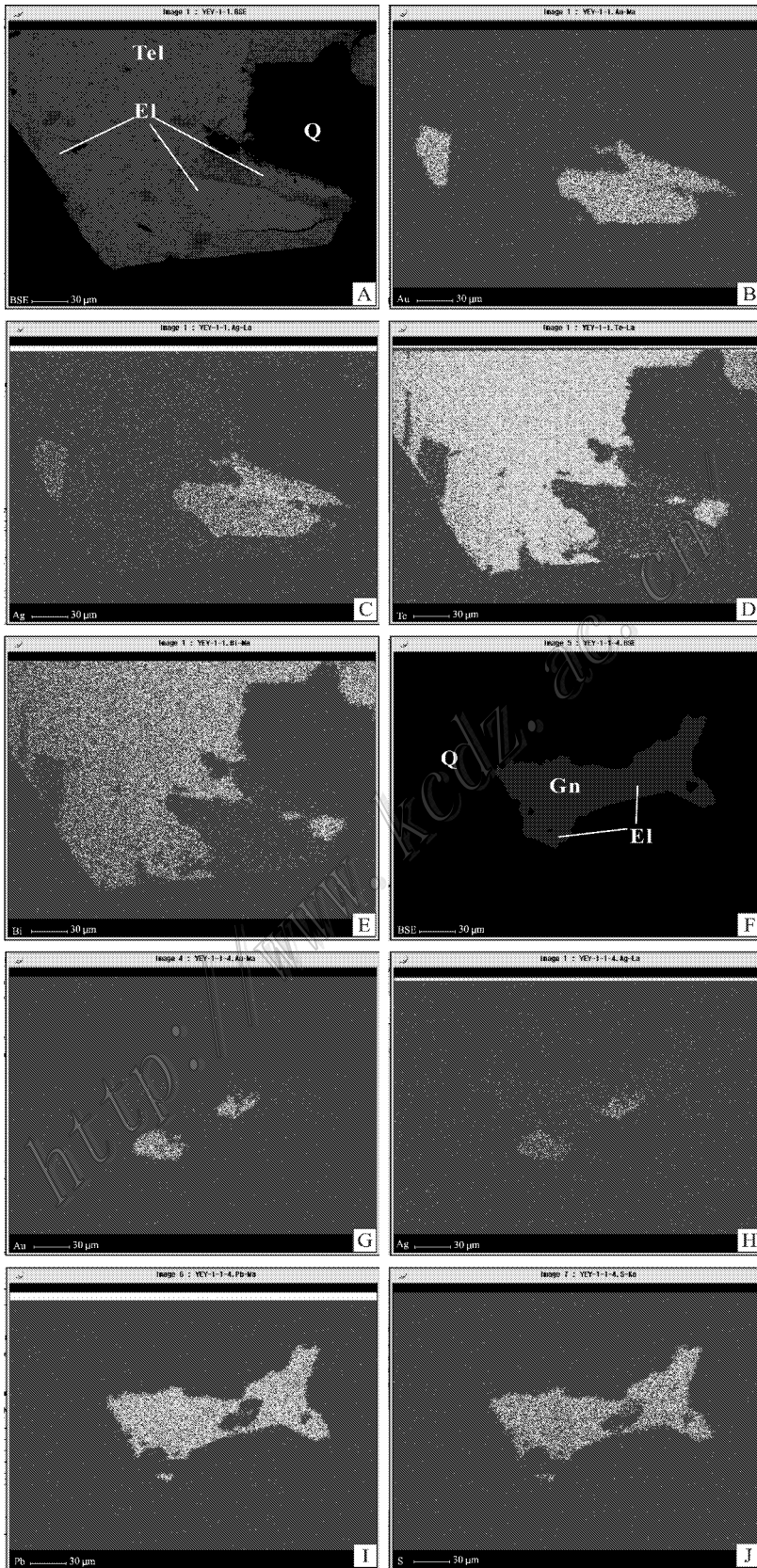


图5 峪耳崖金矿床金属矿物背散射及面扫描照片

A. 碲铋矿与银金矿共生的背散射照片, 黑色部分为石英; B. 与碲铋矿共生的银金矿中 Au 元素的面扫描照片; C. 与碲铋矿共生的银金矿中

Ag 元素的面扫描照片；D. 与银金矿共生的碲铋矿中 Te 元素的面扫描照片；E. 与银金矿共生的碲铋矿中 Bi 元素的面扫描照片；F. 方铅矿与银金矿共生的背散射照片，黑色部分为石英；G. 与方铅矿共生的银金矿中 Au 元素的面扫描照片；H. 与方铅矿共生的银金矿中 Ag 元素的面扫描照片；I. 与银金矿共生的方铅矿中 Pb 元素的面扫描照片；J. 与银金矿共生的方铅矿中 S 元素的面扫描照片

Fig. 5 BSE and scanning microanalysis images of metallic minerals from the Yuerya gold deposit

A. BSE images of electrum intergrown with tellurobismuthite, the black part being quartz; B. Au scanning microanalysis image of electrum intergrown with tellurobismuthite; C. Ag scanning microanalysis image of electrum intergrown with tellurobismuthite; D. Te scanning microanalysis image of tellurobismuthite intergrown with electrum; E. Bi scanning microanalysis image of tellurobismuthite intergrown with electrum; F. BSE image of galena intergrown with electrum, the black part being quartz; G. Au scanning microanalysis image of electrum intergrown with galena; H. Ag scanning microanalysis image of electrum intergrown with galena; I. Pb scanning microanalysis image of galena intergrown with electrum; J. S scanning microanalysis image of galena intergrown with electrum

表 1 峪耳崖金矿床黄铁矿电子探针分析数据

Table 1 Electron microscopic analyses of pyrite from the Yuerya gold deposit

样品号	矿化阶段	$w(B)\%$								总和
		S	Fe	Co	Ni	Cu	As	Se	Te	
YFY-20-2-1	1	52.58	46.62	—	0.22	—	0.27	—	0.24	99.93
YFY-20-2-2	1	52.53	46.83	0.25	0.03	—	—	—	—	99.64
YFY-20-2-3	1	52.31	46.66	0.04	0.34	0.01	0.35	—	0.04	99.75
YFY-20-2-4	1	52.29	46.74	0.10	0.13	0.03	0.26	0.11	—	99.66
YFY-20-2-5	1	52.25	46.37	0.23	0.29	0.04	0.11	0.11	0.01	99.41
YFY-20-2-6	1	52.44	46.67	0.13	0.20	0.05	—	—	—	99.49
YFY-20-2-7	1	52.39	46.62	0.02	—	—	0.06	—	0.06	99.15
YFY-20-2-11-1	1	52.38	46.78	—	0.14	—	0.25	0.18	0.12	99.85
YFY-20-2-11-2	1	52.06	46.89	0.31	0.02	—	0.17	—	0.01	99.46
YFY-20-2-11-3	1	52.07	46.73	0.22	0.16	—	0.28	0.05	—	99.51
YFY-22-1-1	2	52.42	46.63	0.14	—	0.07	0.36	—	0.01	99.63
YFY-22-1-2	2	52.52	46.46	0.08	0.12	—	0.58	—	0.13	99.89
YFY-22-1-3	2	51.81	46.43	0.30	0.26	0.02	0.41	—	0.06	99.29
YFY-13-2-4-1	3	51.81	47.26	0.16	—	—	—	—	0.02	99.25
YFY-13-2-4-2	3	51.42	47.46	0.14	0.06	0.05	0.02	—	—	99.15
YFY-13-2-4-3	3	51.94	46.90	0.40	0.23	—	—	—	—	99.47
YFY-1-2-2-1	3	52.40	46.76	0.27	—	0.14	0.20	0.15	—	99.92
YFY-1-2-2-2	3	52.24	46.93	0.24	0.03	0.17	0.10	—	—	99.71
YFY-1-2-2-3	3	52.36	47.19	—	0.11	—	0.11	—	—	99.77
YFY-1-2-5-1	3	52.24	46.77	0.13	0.06	0.06	—	—	—	99.26
YFY-1-2-5-2	3	52.10	46.86	0.14	—	—	0.12	—	0.11	99.33
YFY-1-2-5-3	3	52.42	46.57	0.17	0.18	0.02	0.05	—	—	99.41
YFY-1-2-6-1	3	52.08	46.68	0.21	0.07	—	0.08	0.04	—	99.16
YFY-1-2-6-2	3	52.32	46.33	0.11	0.14	0.18	0.14	0.14	0.06	99.42
YFY-1-2-6-3	3	52.43	46.69	0.26	—	0.42	0.03	—	—	99.83
YFY-1-2-6-4	3	51.93	46.84	0.22	0.11	—	—	0.02	0.04	99.16
YFY-13-1-5-1	4	52.37	47.16	—	0.12	—	—	—	0.01	99.66
YFY-13-1-5-2	4	52.60	46.80	0.16	0.22	0.15	—	—	—	99.93
YFY-13-1-5-3	4	52.77	46.50	—	—	0.15	—	—	—	99.42
YFY-13-1-6-1	4	51.67	47.32	0.06	0.09	—	—	—	0.03	99.17
YFY-13-1-6-2	4	52.40	47.07	0.06	—	—	—	0.02	—	99.55
YFY-13-1-6-3	4	51.58	46.86	0.17	0.20	0.17	—	—	0.10	99.08
YFY-20-1-1-1	4	51.92	46.77	0.12	0.24	0.25	—	—	0.07	99.37
YFY-20-1-1-2	4	52.06	46.69	0.04	0.09	0.11	0.20	0.07	—	99.26
YFY-20-1-1-3	4	51.60	46.88	0.05	0.07	0.03	0.49	0.03	0.16	99.31
YFY-20-1-2-1	4	52.43	46.23	0.05	0.08	—	0.36	0.01	0.01	99.17

续表 1
Contn. Table 1

样品号	矿化阶段	$\alpha(B)\%$								
		S	Fe	Co	Ni	Cu	As	Se	Te	总和
YEY-20-1-2-2	4	52.53	46.80	0.13	0.12	0.08	-	-	0.03	99.69
YEY-20-1-2-3	4	51.97	46.69	0.12	0.12	-	0.38	-	0.06	99.34
YEY-8-2-8-1	4	51.72	47.40	0.08	0.04	-	0.17	0.12	0.10	99.63
YEY-8-2-8-2	4	52.25	46.91	0.09	0.15	-	0.03	-	-	99.43
YEY-8-2-8-3	4	52.19	46.76	0.29	0.12	0.26	-	-	-	99.62
YEY-21-1-1	4	52.34	46.89	0.02	0.08	-	0.35	-	0.02	99.70
YEY-21-1-2	4	52.60	46.71	0.25	0.27	-	0.18	-	0.01	100.02
YEY-21-1-3	4	52.43	46.69	0.01	0.09	-	-	0.14	-	99.36
YEY-21-2-1	4	52.40	47.06	0.13	0.19	-	0.41	-	-	100.19
YEY-21-2-2	4	52.52	46.79	0.07	0.12	0.18	0.01	0.04	0.08	99.81
YEY-21-2-3	4	52.46	46.67	-	-	0.02	0.69	0.11	-	99.95
YEY-21-3-1	4	52.50	46.72	0.30	0.06	-	0.10	-	-	99.68
YEY-21-3-2	4	52.96	47.08	0.18	0.11	-	-	-	-	100.33
YEY-21-3-3	4	52.32	46.97	0.02	0.15	0.17	-	0.07	0.09	99.79
YEY-21-4-1	4	52.95	46.44	-	-	0.02	0.13	0.11	-	99.65
YEY-21-4-2	4	52.48	46.60	-	0.25	-	-	-	-	99.33
YEY-21-4-3	4	52.53	46.73	0.11	0.05	0.01	-	-	0.01	99.44

测试单位:中国地质大学(北京)电子探针实验室;“-”为未检出。

的形式代替 Fe。从第 1 到第 4 矿化阶段,Co/Ni 值的变化趋势为 3.93→0.91→2.62→1.10,总的平均值为 1.93。在岩浆热液中,Co 比 Ni 具有更强的亲硫性,因此,岩浆热液成因黄铁矿的 Co/Ni 值大于 1,其范围为 1~5(王奎仁,1989),而且,Co/Ni 值越大,矿床的形成温度越高(周文雅,2001),据此可推断,峪耳崖金矿床中的黄铁矿属于热液成因,而且,该金矿床的成矿温度为中温。结合黄铁矿的 Se/Te 值大部分都小于 1,及其 Fe/S 值平均为 0.895,接近热液成因黄铁矿的 Fe/S 值(0.877),也可推断峪耳崖金矿床为岩浆热液矿床(郭福祺,1988;范长福等,2011)。

4.2 黄铜矿

黄铜矿的 $\alpha(\text{Cu})$ 为 33.76%~35.15%,平均为 34.38%; $\alpha(\text{Fe})$ 为 29.7%~30.68%,平均为 30.12%; $\alpha(\text{S})$ 为 34.1%~35.37%,平均为 34.9%(表 2)。与理论值 [$\alpha(\text{Cu})$ 为 34.56%, $\alpha(\text{Fe})$ 为 30.52%, $\alpha(\text{S})$ 为 34.92%] 相比,它们的含量均略低。其原因是,在黄铜矿大量沉淀的第 3 矿化阶段,黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等硫化物也在沉淀,三者之间必然存在对 Cu、Fe、S 的争夺,同时,Co 和 Ni 混入黄铜矿的晶格替代 Fe,从而造成黄铜矿中主要元素的含量略低于理论值。

4.3 闪锌矿

闪锌矿的 $\alpha(\text{S})$ 为 32.35%~33.42%,平均为 32.85%; $\alpha(\text{Pb})$ 为 0.79%~1.73%,平均为 1.21%; $\alpha(\text{Zn})$ 为 58.64%~65.99%,平均为 63.28%; $\alpha(\text{Fe})$ 为 0.14%~4.51%,平均为 1.87%(表 3)。 $\alpha(\text{Fe})$ 较低,在一定程度上反映出其形成温度不会很高(舒斌等,2006)。

由图 6 可见,随着 $\alpha(\text{Zn})$ 的增加, $\alpha(\text{Fe})$ 呈降低趋势,显示出 Fe 替代 Zn 进入闪锌矿的晶格。由图 7 可见,随着 $\alpha(\text{Zn})$ 的增加,Ga 的替代强度变化不大,而 Ge、In 的替代强度则有所升高。根据 $\alpha(\text{Fe})$ 计算出闪锌矿的 $\alpha(\text{FeS})$ (表 3),其变化范围为 0.22%~7.08% 并可分成 3 个区间,第 1 区间为 0.22%~0.80%,数量较少;绝大部分都分布在 1.16%~4.27% 和 5.46%~7.08% 这 2 个区间内。闪锌矿的 $\alpha(\text{FeS})$ 与其形成温度有一定关系,中-高温范围的 $\alpha(\text{FeS})$ 为 12.24%~15.90%,其形成温度为 400~500℃;中温范围的 $\alpha(\text{FeS})$ 为 4.63%~7.74%,其形成温度为 200~300℃;低温范围的 $\alpha(\text{FeS})$ 为 1.07%~1.52%,其形成温度为 100~200℃(王濮等,1982)。据此可看出,峪耳崖金矿床中闪锌矿的形成温度跨越了中温与低温的范围,但尚未达到高温范围。综上所述,笔者推断峪耳崖金矿应为中温矿床。

表 2 峪耳崖金矿床黄铜矿电子探针分析数据

Table 2 Electron microscopical analyses of chalcopyrite from the Yuerya gold deposit

样品号	矿化阶段	wt(B) %								总和
		S	Fe	Co	Ni	Cu	As	Se	Te	
YEY-13-1-1-1	3	35.53	29.91	0.04	0.08	34.59	—	0.25	—	100.40
YEY-13-1-1-2	3	35.22	29.79	0.03	0.02	35.15	0.08	0.03	0.01	100.33
YEY-13-1-1-3	3	34.80	29.91	0.03	0.16	34.31	—	—	—	99.21
YEY-13-1-1-4	3	35.07	29.78	0.17	0.16	34.49	—	—	—	99.67
YEY-13-1-1-5	3	34.96	30.21	0.08	—	34.52	0.01	0.07	—	99.85
YEY-13-1-1-6	3	34.97	30.18	0.04	0.06	34.01	0.06	—	—	99.32
YEY-13-2-1-1	3	35.03	30.15	0.07	0.04	34.51	0.06	0.04	—	99.90
YEY-13-2-1-2	3	34.43	30.09	0.08	0.11	34.78	0.08	—	—	99.57
YEY-13-2-1-3	3	34.10	30.12	—	0.15	34.82	0.11	—	—	99.30
YEY-13-2-1-4	3	34.98	30.13	—	—	34.66	0.07	—	—	99.84
YEY-13-2-1-5	3	34.91	29.89	0.09	0.05	34.40	0.11	0.03	—	99.48
YEY-13-2-2-1	3	34.64	30.30	0.12	0.04	34.84	—	0.04	—	99.98
YEY-13-2-2-2	3	34.93	30.02	—	0.03	34.17	0.03	0.04	0.06	99.28
YEY-13-2-2-3	3	34.74	29.96	0.03	0.09	34.79	0.09	—	0.12	99.82
YEY-13-2-2-4	3	35.04	29.92	0.04	—	34.68	0.07	—	—	99.75
YEY-18-2-1	3	35.04	30.56	0.06	—	33.90	—	—	0.01	99.57
YEY-18-2-2	3	35.01	30.41	0.09	—	33.92	—	0.02	0.01	99.46
YEY-18-2-3	3	34.74	30.49	—	0.05	34.07	0.06	—	—	99.41
YEY-18-2-4	3	35.18	30.54	0.05	—	33.91	0.09	0.07	—	99.84
YEY-18-2-5	3	35.00	29.95	—	0.02	34.26	—	0.08	0.04	99.35
YEY-18-3-1	3	34.72	30.59	0.04	0.01	34.11	—	—	—	99.47
YEY-18-3-2	3	34.45	30.04	—	—	34.70	0.19	0.14	0.12	99.64
YEY-18-3-3	3	34.49	30.04	0.34	—	34.29	0.20	0.15	0.16	99.67
YEY-21-6-1	3	34.63	29.88	0.03	0.10	34.43	0.13	0.13	0.10	99.43
YEY-21-6-2	3	34.92	29.96	—	—	34.45	0.01	0.08	0.01	99.43
YEY-21-6-3	3	35.03	30.02	—	—	34.13	0.15	0.06	—	99.39
YEY-22-1-11-1	3	35.03	30.13	0.10	0.09	34.21	—	0.06	—	99.62
YEY-22-1-11-2	3	35.12	30.26	0.04	0.07	34.07	0.05	—	—	99.61
YEY-22-1-11-3	3	35.37	30.46	—	—	33.92	0.12	0.07	—	99.94
YEY-22-1-12-1	3	35.22	29.83	—	0.16	34.10	—	0.12	—	99.43
YEY-22-1-12-2	3	35.31	30.62	—	0.16	33.81	—	—	—	99.90
YEY-22-1-12-3	3	34.56	30.36	0.07	—	34.32	—	—	—	99.31
YEY-8-2-1-1	3	34.55	30.22	—	0.05	34.12	—	0.08	0.04	99.06
YEY-8-2-1-2	3	34.52	30.50	0.08	0.22	34.02	0.03	0.04	0.04	99.45
YEY-8-2-1-3	3	34.72	30.24	0.10	—	34.30	0.02	—	—	99.38
YEY-8-2-2-1	3	34.79	30.00	0.15	—	34.41	0.04	—	—	99.39
YEY-8-2-2-2	3	35.15	30.17	—	—	34.74	0.07	—	0.06	100.19
YEY-8-2-2-3	3	35.13	30.35	0.09	—	34.44	—	—	0.01	100.02
YEY-13-1-7-1	3	35.02	29.70	0.03	—	34.50	0.11	0.06	0.09	99.51
YEY-13-1-7-2	3	34.98	29.70	—	—	34.40	0.13	0.08	—	99.29
YEY-13-1-7-3	3	35.22	30.14	0.25	0.07	33.76	—	—	—	99.44
YEY-17-2-1	3	34.75	30.24	0.11	0.03	34.72	0.02	0.10	0.01	99.98
YEY-17-2-2	3	34.78	30.68	0.01	0.01	34.62	—	0.13	0.27	100.50
YEY-17-2-3	3	34.75	30.13	0.05	—	35.03	—	—	0.01	99.97
YEY-20-1-6-1	3	34.90	30.28	0.09	—	34.76	0.05	—	0.07	100.15
YEY-20-1-6-2	3	35.03	29.75	0.12	0.06	34.74	—	—	0.05	99.75
YEY-20-1-6-3	3	35.04	30.06	0.10	0.12	34.64	0.08	—	—	100.04
YEY-20-1-7-1	3	35.03	30.10	0.17	—	34.20	0.03	0.03	0.07	99.63
YEY-20-1-7-2	3	34.84	30.27	0.08	0.12	34.30	—	—	0.04	99.65
YEY-20-1-7-3	3	34.67	30.30	0.17	0.01	34.10	—	—	0.05	99.30
YEY-21-5-1	3	34.59	29.60	0.02	0.03	34.69	0.03	0.16	0.12	99.24
YEY-21-5-2	3	34.81	29.82	0.13	0.12	34.34	0.05	0.01	—	99.28
YEY-21-5-3	3	35.03	29.81	0.22	—	34.43	—	—	—	99.49
YEY-21-7-1	3	34.99	29.92	0.03	0.02	34.10	0.13	0.02	0.05	99.26
YEY-21-7-2	3	34.82	30.34	0.13	—	34.10	0.14	0.05	0.10	99.68
YEY-21-7-3	3	35.18	29.98	—	0.10	34.25	0.02	—	0.02	99.55

测试单位:中国地质大学(北京)电子探针实验室;“—”为未检出。

表3 峪耳崖金矿床闪锌矿电子探针分析数据

Table 3 Electron microscopic analyses of sphalerite from the Yuerya gold deposit

样品号	矿化阶段	$\omega(B)/\%$										
		S	Mn	Fe	Cu	Zn	Ga	Ge	In	Pb	总和	FeS
YHEY-18-1-1	3	33.09	0.03	2.72	0.21	62.96	-	-	0.07	1.27	100.35	4.27
YHEY-18-1-2	3	33.16	0.05	3.59	-	61.93	0.23	-	-	1.30	100.26	5.64
YHEY-18-1-3	3	33.24	0.03	3.93	3.21	58.64	-	-	-	1.26	100.31	6.17
YHEY-18-6-1	3	32.68	-	1.48	0.94	63.23	0.02	-	0.06	1.29	99.70	2.32
YHEY-18-6-2	3	32.57	0.04	1.22	1.02	62.87	0.32	-	0.15	1.24	99.43	1.92
YHEY-18-6-3	3	32.35	0.07	1.35	1.53	63.03	-	-	-	1.45	99.78	2.12
YHEY-20-1-3-1	3	32.98	0.04	2.05	0.44	63.14	-	-	0.15	1.09	99.89	3.22
YHEY-20-1-3-2	3	32.79	0.04	1.00	0.03	64.25	0.07	0.20	-	1.23	99.61	1.57
YHEY-20-1-3-3	3	32.43	-	1.09	0.06	64.73	-	-	-	1.19	99.50	1.71
YHEY-20-1-4-1	3	33.42	-	0.74	0.20	64.52	-	-	0.15	0.89	99.92	1.16
YHEY-20-1-4-2	3	32.62	-	0.77	-	64.72	-	-	0.22	1.34	99.67	1.21
YHEY-20-1-4-3	3	33.09	-	1.11	0.50	63.06	-	-	0.39	1.73	99.88	1.74
YHEY-22-1-14-1	3	33.15	0.03	3.48	-	61.99	0.01	0.09	-	0.96	99.71	5.46
YHEY-22-1-14-2	3	32.68	-	4.51	0.05	61.39	-	0.05	0.04	1.25	99.97	7.08
YHEY-22-1-14-3	3	32.92	0.10	3.59	-	61.71	0.09	0.16	-	1.15	99.72	5.64
YHEY-22-1-10-1	3	32.57	0.01	0.30	0.16	65.42	-	-	0.10	1.26	99.82	0.47
YHEY-22-1-10-2	3	32.74	0.03	0.51	0.10	65.99	-	-	-	0.79	100.16	0.80
YHEY-22-1-10-3	3	32.90	-	0.14	-	65.43	0.18	-	-	1.01	99.66	0.22

测试单位:中国地质大学(北京)电子探针实验室;“-”为未检出。

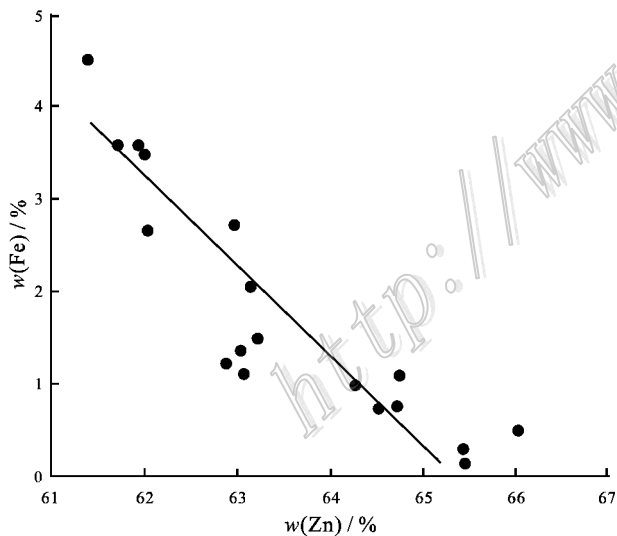


图6 峪耳崖金矿床闪锌矿 Fe-Zn 协变图

Fig. 6 Diagram of Fe replacing Zn in sphalerite from the Yuerya gold deposit

4.4 方铅矿

方铅矿的 $\omega(S)$ 为 13.14% ~ 13.72%, 平均为 13.45%。 $\omega(Pb)$ 为 84.76% ~ 86.82%, 平均为 85.81%(表 4)。与理论值相比,其 S 含量略高,Pb 含量则较低。Pb/S 值为 6.24 ~ 6.52, 平均为 6.38, 低于方铅矿 Pb/S 的理论值(6.46)。其 Pb 含量低是

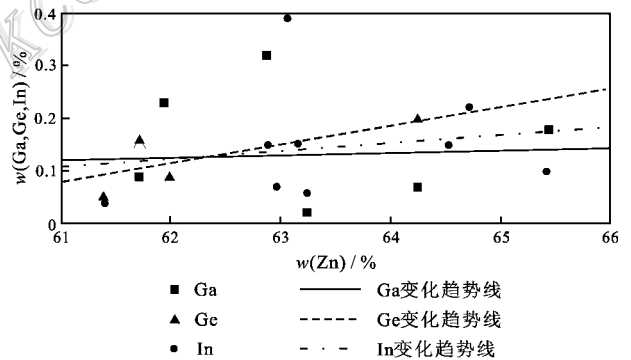


图7 峪耳崖金矿床闪锌矿 Ga、Ge、In-Zn 协变图

Fig. 7 Diagram of Ga, Ge and In replacing Zn in sphalerite from the Yuerya gold deposit

由 Fe、Cu、Zn 的替代造成的。

方铅矿是银的主要载体矿物(朱笑青等,2005)。在方铅矿中,Ag 的赋存形式主要有 2 种:含 Ag 矿物的微小包裹体及 Ag 对方铅矿晶格中 Pb 的替代(谌剑等,2005)。由电子探针面扫描图像(图 5H)可见,方铅矿的 Ag 含量较高,分布较均匀,并且,Ag 含量与 Pb 含量呈负相关关系,说明 Ag 以类质同象形式在晶格中占据 Pb 的位置。其 $\omega(Ag)$ 平均为 0.27%, 含量较高,推测其成因与岩浆活动有关(舒斌等,2006)。有关研究表明,方铅矿常与硒铅矿

表 4 峪耳崖金矿床方铅矿电子探针分析数据

Table 4 Electron microscopic analyses of galena from the Yuerya gold deposit

样品号	矿化阶段	$w(B)\%$									
		S	Fe	Cu	Zn	As	Ag	Cd	Sb	Pb	总和
YEY-1-1-11-1	3	13.25	0.07	0.10	0.31	-	0.13	0.13	-	85.26	99.25
YEY-1-1-11-2	3	13.51	0.02	0.05	0.28	-	0.07	0.03	-	85.35	99.31
YEY-1-1-11-3	3	13.61	0.15	-	0.13	0.05	0.23	-	-	85.25	99.42
YEY-1-1-11-4	3	13.41	0.45	0.15	-	-	0.34	-	-	85.60	99.95
YEY-1-1-13-1	3	13.36	0.09	0.21	0.01	-	-	-	-	86.26	99.93
YEY-1-1-13-2	3	13.41	0.12	0.23	0.02	0.01	0.20	0.01	-	85.38	99.38
YEY-1-1-13-3	3	13.41	0.04	0.21	0.01	-	0.24	0.17	-	85.07	99.15
YEY-1-1-13-4	3	13.66	0.20	-	-	-	-	0.14	-	85.84	99.84
YEY-1-1-14-1	3	13.37	0.22	0.11	-	-	0.01	-	-	85.73	99.44
YEY-1-1-14-2	3	13.30	0.10	-	-	-	-	-	-	86.09	99.49
YEY-1-1-14-3	3	13.72	0.04	-	0.05	0.06	0.08	-	-	85.57	99.52
YEY-1-1-14-4	3	13.59	0.25	0.23	-	-	0.07	0.01	-	85.05	99.20
YEY-3-6-1	3	13.48	0.20	0.21	0.16	-	-	-	-	86.02	100.07
YEY-3-6-2	3	13.46	0.06	-	0.01	0.08	-	-	-	86.69	100.30
YEY-3-6-3	3	13.33	0.07	0.04	-	-	-	-	-	86.72	100.16
YEY-3-6-4	3	13.38	0.02	-	0.14	0.03	-	0.20	-	86.55	100.32
YEY-10-2-1	3	13.14	0.04	-	0.05	0.17	0.35	-	0.07	85.67	99.49
YEY-10-2-2	3	13.37	0.05	0.16	-	0.04	0.62	0.03	-	85.31	99.58
YEY-10-2-3	3	13.54	0.07	0.05	0.34	-	0.65	-	-	85.78	100.43
YEY-10-2-4	3	13.28	0.24	0.22	-	-	0.91	-	0.10	84.76	99.51
YEY-21-Pb-1-1	3	13.68	0.35	0.11	0.18	0.10	-	-	-	86.19	100.61
YEY-21-Pb-1-2	3	13.57	0.53	-	-	0.05	0.14	0.01	-	85.80	100.10
YEY-21-Pb-1-3	3	13.63	0.30	0.06	0.14	0.10	-	-	-	86.82	101.05
YEY-21-Pb-2-1	3	13.54	0.61	0.09	0.08	-	-	-	-	86.35	100.67
YEY-21-Pb-2-2	3	13.31	0.50	0.03	-	-	-	-	-	86.25	100.09
YEY-21-Pb-2-3	3	13.31	1.00	0.10	-	0.02	0.03	0.02	-	85.76	100.24

测试单位:中国地质大学(北京)电子探针实验室;“-”为未检出。

(PbSe) 碲铅矿(PbTe)、辉锑银矿(AgSbS₂)、硫银铋矿(AgBiS₂)等形成程度不同的固溶体(徐国风等, 1979),这可能与峪耳崖金矿床中方铅矿与碲铋矿共生有关,具体机制尚不清楚。Cd的结晶化学性质与Zn、Fe、Cu和Pb相似,故可以类质同象形式替代以上元素进入方铅矿。

4.5 碲铋矿

对峪耳崖金矿床石英中的碲铋矿进行了成分分析。分析结果表明,碲铋矿的 $w(\text{Fe})$ 为0.01%~1%,平均为0.29%; $w(\text{Ag})$ 为0.12%~0.86%,平均为0.49%; $w(\text{Te})$ 为46.79%~47.77%,平均为47.37%; $w(\text{Bi})$ 为50.83%~52.05%,平均为51.42%(表5)。

第2矿化阶段的碲铋矿, $w(\text{Fe})$ 平均为0.36%, $w(\text{Ag})$ 平均为0.45%, $w(\text{Te})$ 平均为47.32%, $w(\text{Bi})$ 平均为51.47%。第3矿化阶段的碲铋矿, $w(\text{Fe})$ 平均为0.20, $w(\text{Ag})$ 平均为0.54%, $w(\text{Te})$ 平均为47.45%, $w(\text{Bi})$ 平均为51.35%。对比第2矿化阶段与第3矿化阶段碲铋矿中各元素的含量可

以看出,其Fe和Bi的含量有降低的趋势,而Ag、Te的含量则有升高的趋势。Fe含量降低,其原因可能是流体中的大部分Fe已进入硫化物,随着温度的降低,又有相当一部分Fe形成菱铁矿而沉淀,造成碲铋矿中Fe含量降低。Te含量升高,是因为随着硫逸度的下降及碲逸度的上升,Te可与Bi形成独立矿物而晶出,致使碲铋矿的Te含量升高。同时,Ag易于在成矿后期富集,可替代Bi进入碲铋矿晶格,造成Ag含量上升。Te为强电负性元素,元素地球化学研究表明,Te具有亲硫性,在高温条件下具有挥发性,在水溶液中为强电解质,是良好的运矿剂(韩吟文等, 2003),在热液活动阶段可受Bi、Au、Ag等元素的制约而沉淀形成独立矿物(刘埃平等, 1996; 司荣军等, 2006)。但是,由于Bi亦具亲硫性,在S²⁻浓度较大的情况下会优先与S²⁻结合形成硫化物而沉淀,同时,Te因具亲硫性也会进入硫化物(如黄铁矿、黄铜矿等),因此,在多金属硫化物矿化阶段,由于Cu、Pb、Zn等的亲硫性比Bi更强而优先与S²⁻结合,致使S²⁻浓度大幅度下降,在金属硫化物大量沉

表5 峪耳崖金矿床碲铋矿电子探针分析数据

Table 5 Electron microscopic analyses of tellurobismuthite from the Yuerya gold deposit

样品号	矿化阶段	$w(B)/\%$				
		Fe	Ag	Te	Bi	总和
YFY-3-4-1	2	0.18	0.26	47.54	51.86	99.84
YFY-3-4-2	2	—	0.27	47.77	51.82	99.86
YFY-3-4-3	2	0.01	0.37	47.67	51.86	99.91
YFY-8-2-3-1	2	0.45	0.75	47.03	51.42	99.65
YFY-8-2-3-2	2	0.18	0.15	47.6	51.55	99.48
YFY-8-2-3-3	2	0.42	0.53	46.87	51.70	99.52
YFY-8-2-4-1	2	0.38	0.71	47.26	51.29	99.64
YFY-8-2-4-2	2	0.29	0.82	46.79	51.30	99.20
YFY-8-2-4-3	2	0.69	0.65	46.89	51.40	99.63
YFY-20-1-5-1	2	0.83	0.12	47.47	51.36	99.78
YFY-20-1-5-2	2	0.48	0.25	47.64	51.15	99.52
YFY-20-1-5-3	2	0.53	0.38	47.29	51.51	99.71
YFY-21-9-1	2	0.37	0.39	47.14	51.35	99.25
YFY-21-9-2	2	0.37	0.41	47.46	50.91	99.15
YFY-21-9-3	2	1.00	0.22	47.11	51.20	99.53
YFY-1-1-3-1	2	—	0.27	47.67	51.75	99.69
YFY-1-1-3-2	2	0.12	0.23	47.40	51.28	99.03
YFY-1-1-3-3	2	—	0.45	47.70	52.05	100.2
YFY-1-1-5-1	2	0.06	0.85	47.17	51.48	99.56
YFY-1-1-5-2	2	0.09	0.70	47.04	51.31	99.14
YFY-1-1-5-3	2	0.06	0.61	47.10	51.58	99.35
YFY-1-1-5-4	2	—	0.55	47.16	51.46	99.17
YFY-1-1-5-5	2	0.04	0.45	47.50	51.21	99.20
YFY-1-1-7-1	3	0.02	0.83	47.61	51.12	99.58
YFY-1-1-7-2	3	—	0.80	47.69	50.83	99.32
YFY-1-1-7-3	3	0.18	0.86	47.68	51.10	99.82
YFY-1-1-7-4	3	0.24	0.60	47.35	51.14	99.33
YFY-3-1-1-6	3	0.31	0.25	47.48	51.23	99.27
YFY-3-1-1-7	3	0.23	0.42	47.65	51.40	99.70
YFY-3-1-1-8	3	—	0.46	47.14	51.58	99.18
YFY-3-1-1-9	3	0.17	0.39	47.58	51.86	100.00
YFY-21-8-1	3	0.08	0.53	47.48	51.49	99.58
YFY-21-8-2	3	0.15	0.48	47.09	51.57	99.29
YFY-21-8-3	3	0.21	0.67	47.74	51.06	99.68
YFY-21-10-1	3	0.11	0.43	47.29	51.49	99.32
YFY-21-10-2	3	0.44	0.40	47.37	51.40	99.61
YFY-21-10-3	3	0.27	0.50	47.13	51.63	99.54

测试单位：中国地质大学(北京)电子探针实验室；“—”为未检出。

淀后, 硫逸度降低而碲逸度较高, 使得 Te 可与 Bi 相结合而形成碲铋矿。Au 在地球化学性质上与 Te 具有相似性, 可在相似的物理化学条件下沉淀(罗镇宽等, 1999), 因此, 在峪耳崖金矿床中, 碲铋矿的产出与银金矿具有较紧密的关系。据前人研究, 碲矿物的出现可反映出成矿作用中有岩浆物质或深源物质的加入(谢家东等, 2000; 陈柏林等, 2000), 故笔者推断, 峪耳崖金矿床的成矿物质可能来自深源, 与岩浆有关。

4.6 银金矿

根据载金矿物的不同, 峪耳崖金矿床矿石中的银金矿可分为 2 种类型: 被黄铁矿包裹的和被碲铋矿包裹的。前一种银金矿是在第 2 矿化阶段早期(2-1 阶段)被黄铁矿包裹的, 其 $w(Au)$ 为 79.35% ~ 88.81%, 平均为 84.75%; $w(Ag)$ 为 10.95% ~ 20.25%, 平均为 14.76%; $w(Cu)$ 为 0.1% ~ 0.33%, 平均为 0.2%(表 6)。后一种银金矿是在第 2 矿化阶段晚期(2-2 阶段)被碲铋矿包裹的, 其

$\alpha(\text{Au})$ 为 87.76% ~ 88.91%, 平均为 88.22%;
 $\alpha(\text{Ag})$ 为 10.87% ~ 11.72%, 平均为 11.43%;
 $\alpha(\text{Cu})$ 为 0.04% ~ 0.3%, 平均为 0.13% (表 6)。

由上述数据可见,被碲铋矿包裹的银金矿的 $\alpha(\text{Au})$ 要高于被黄铁矿包裹的银金矿,但其 $\alpha(\text{Ag})$ 和 $\alpha(\text{Cu})$ 则是低于后者。其原因是, Au 与 Ag 之间的矿物为一个类质同象系列(王濮等, 1982), Ag 和 Cu 是以替代 Au 的形式进入银金矿的晶格, 故而, Au 的含量高则 Cu 和 Ag 的含量必然低。

由金的成色可见,被黄铁矿包裹的银金矿,其金的成色分为 2 个区间,第一个区间为 796.7~823.1,第二个区间为 862.5~890.2。被碲铋矿包裹的银金矿,其金成色的分布则比较均匀,为 882.3~891.1。金的成色与成矿温度和矿床形成深度有一定关系(聂凤莲等, 2003; 徐万臣, 2006; 寇大明等, 2010), 将峪耳崖矿床中银金矿的成色数据投图(图 8)可以看出,所有投点全都落在中温范围内,据此推断峪耳崖金矿床为中温矿床。有关研究表明,矿床的形成深

度越大,金的成色越高。一般认为,在深成及中深成矿床中,金的成色大于 800; 在浅成或地表金矿床中,金的成色低于 700(徐万臣, 2006; 寇大明等, 2010), 根据金的成色数据可判断峪耳崖金矿床应为中深成金矿床。

5 成矿流体来源及成矿硫源

5.1 热液来源

应用氢、氧同位素来判断成矿热液中水的来源,对解决矿床成因及成矿理论都具有重要意义。石英是最易保存原始信息的矿物。选取峪耳崖矿床井下第 2、3、4 矿化阶段的烟灰色石英作为测试样品。先将石英样品破碎至约 60~80 目,然后在双目镜下手工挑纯。测试单位为核工业北京地质研究院分析测试研究中心;测试仪器为 MAT-253 质谱仪;测试方法和依据为 DZ/T0184.19-1997 天然水中氢同位素锌还原法测定及 DZ/T0184.13-1997 硅酸盐和氧化

表 6 峪耳崖金矿床银金矿电子探针分析数据

Table 6 Electron microscopic analyses of electron from the Yuerya gold deposit

样品号	矿化阶段	$\alpha(\text{B})/\%$			总和	金的成色
		Cu	Ag	Au		
YEY-3-5-1	2-1	0.30	11.35	88.20	99.85	886.00
YEY-3-5-2	2-1	-	11.21	88.14	99.35	887.20
YEY-3-5-3	2-1	0.10	11.19	88.28	99.57	887.50
YEY-3-5-4	2-1	0.12	10.95	88.81	99.88	890.20
YEY-3-5-5	2-1	-	11.16	88.64	99.80	888.20
YEY-10-1-1	2-1	-	13.74	86.22	99.96	862.50
YEY-10-1-2	2-1	0.11	12.90	86.03	99.04	869.60
YEY-10-1-3	2-1	0.33	12.84	86.34	99.51	870.50
YEY-10-1-4	2-1	-	13.12	86.24	99.36	868.00
YEY-20-2-9-1	2-1	0.22	17.73	81.33	99.28	821.00
YEY-20-2-9-2	2-1	-	18.90	80.78	99.68	810.40
YEY-20-2-9-3	2-1	-	17.64	82.08	99.72	823.10
YEY-20-2-10-1	2-1	0.22	19.84	79.93	99.99	801.10
YEY-20-2-10-2	2-1	0.15	20.25	79.35	99.75	796.70
YEY-20-2-10-3	2-1	0.25	18.65	80.87	99.77	812.60
YEY-3-1-1-1	2-2	-	11.40	88.26	99.66	885.60
YEY-3-1-1-2	2-2	0.04	11.53	87.78	99.35	883.90
YEY-3-1-1-3	2-2	0.05	10.87	88.91	99.83	891.10
YEY-3-1-1-4	2-2	0.08	11.27	88.47	99.82	887.00
YEY-3-1-1-5	2-2	0.30	11.72	87.85	99.87	882.30
YEY-3-2-1	2-2	0.04	11.71	87.76	99.51	882.30
YEY-3-2-2	2-2	0.17	11.41	88.80	100.38	886.10
YEY-3-2-3	2-2	-	11.58	88.32	99.90	884.10
YEY-3-2-4	2-2	0.22	11.40	87.79	99.41	885.10

注:“2-1”为第 2 矿化阶段早期被黄铁矿包裹的银金矿;“2-2”为第 2 矿化阶段晚期被碲铋矿包裹的银金矿。

测试单位:中国地质大学(北京)电子探针实验室;“-”为未检出。

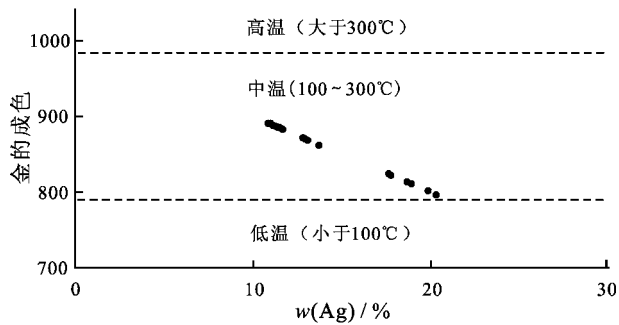


图8 峪耳崖金矿床中金银矿 Au 成色与成矿温度关系图 (底图据聂凤莲等, 2003)

Fig. 8 Correlation between matallogenic temperature and gold fineness in the Yuerya gold deposit (base map after Nie et al., 2003)

物矿物氧同位素组成的五氟化溴法测定。测试结果以 SMOW 为标准, 记为 $\delta^{18}\text{O}$, 分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 由千分馏公式并根据分馏值的加和性原理计算得出: $1000\ln\alpha_{\text{石英}-\text{H}_2\text{O}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{石英}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 。其中 $1000\ln\alpha_{\text{石英}-\text{H}_2\text{O}} = 3.38 \times 10^6 / t^2 - 3.4$ (Clayton et al., 1972)。式中的 t 为所测矿物中包裹体均一温度的算术平均值。温度数据引自董永慧 (2012), 将第 2、3、4 矿化阶段的温度分别定为 350°C 、 320°C 及 305°C 。由于水-岩反应中, δD 一般不发生变化, 因此, 氢同位素仍然应用 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 的测试数值。测试结果及 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 计算值如表 7 所示。

表 7 峪耳崖金矿床氢氧同位素数据

Table 7 H and O isotopic data of the Yuerya gold deposit

样品号	矿化阶段	岩性	$t/^\circ\text{C}$	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$ (计算)
Y EY-1	3	烟灰色石英	320	-78.3	11.7	5.5
Y EY-7	4	烟灰色石英	305	-76.7	12.9	6.2
Y EY-10	3	烟灰色石英	320	-73.7	11.8	5.6
Y EY-13	4	烟灰色石英	305	-72.1	12.2	5.5
Y EY-17	3	烟灰色石英	320	-72.6	12.0	5.8
Y EY-19	4	烟灰色石英	305	-75.5	12.2	5.5
Y EY-20	2	烟灰色石英	350	-75.9	11.3	6.0
Y EY-21	4	烟灰色石英	305	-72.3	12.4	5.7
Y EY-22	2	烟灰色石英	350	-77.5	11.2	5.9

测试单位: 核工业北京地质研究院分析测试研究中心。

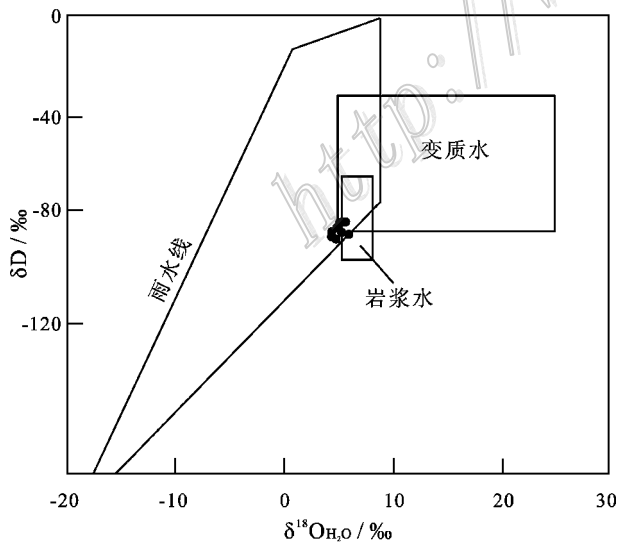


图9 峪耳崖金矿床石英 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解 (底图据 Taylor, 1974)

Fig. 9 Diagram of $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ of quartz from the Yuerya gold deposit (base map after Taylor, 1974)

由以上数据可以看出, 峪耳崖金矿床矿石中石英的氢、氧同位素组成的变化范围小, 极差小, 反映了成矿流体高度均一化和来自深源的特点。将计算得出的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 与 δD 投图 (图 9) 可以看出, 投点大部分落在岩浆水范围内及靠近岩浆水的位置, 说明成矿热液以岩浆水为主。

5.2 硫源

选取烟灰色石英脉中第 2、3、4 矿化阶段的黄铁矿作为测试样品。将样品破碎至约 60~80 目, 然后在双目镜下手工挑纯。测试单位为核工业北京地质研究院分析测试研究中心, 测试仪器为 MAT-251 质谱仪, 测试方法和依据为 DZ/T0184.14-1997 硫化物中硫同位素组成的测定。测试结果示于表 8。

由表 8 可见, 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $2.3\text{‰} \sim 3.5\text{‰}$, 平均为 2.83‰ , 极差为 1.2‰ , 变化范围小, 均一化程度较高, 集中于深部硫的范围内 ($-5\text{‰} \sim 5\text{‰}$), 说明其硫具有深源特征。

表 8 峪耳崖金矿床硫同位素测试数据

Table 8 Sulfur isotopic data of the Yuerya gold deposit

样品编号	矿化阶段	岩性	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}/\text{‰}$
YEY-1	3	黄铁矿	3.1
YEY-7	4	黄铁矿	2.6
YEY-13	4	黄铁矿	2.3
YEY-17	3	黄铁矿	3.5
YEY-19	4	黄铁矿	2.9
YEY-20	2	黄铁矿	2.3
YEY-21	4	黄铁矿	3.3
YEY-22	2	黄铁矿	2.6

测试单位:核工业北京地质研究院分析测试研究中心。

6 讨论与结论

本次研究表明,峪耳崖金矿床的硫源来自于深部岩浆源,热液以岩浆水为主。成矿期分为 4 个矿化阶段。在石英-中粗粒黄铁矿矿化阶段(第 1 矿化阶段),由于生长的空间和时间充足,黄铁矿的晶核数量少,故而,黄铁矿可充分结晶,多呈自形-半自形,晶格较完整,粒度较大而比表面积较小,不利于 Au 元素的沉淀。在石英-细粒黄铁矿-碲铋矿-金矿化阶段(第 2 矿化阶段)以及石英-多金属硫化物-碲铋矿-金矿化阶段(第 3 矿化阶段),由于生长空间的缩小造成黄铁矿晶形残缺,以及较多的 As 进入黄铁矿造成黄铁矿晶格中的空穴,因此,有利于金在黄铁矿表面的吸附沉淀。

在成矿流体中,金主要以 Au-Cl 或 Au-S 络合物的形式迁移,体系内温度、压力、氧逸度、硫逸度的变化均会导致络合物分解、金沉淀(朱永峰等,2010)。Au 被流体萃取活化的过程满足如下反应: $\text{Au} + \text{H}_2\text{S} + \text{HS}^- \rightarrow [\text{Au}(\text{HS})_2]^- + 1/2\text{H}_2$ (赵海玲等,1997)。前人对峪耳崖金矿床流体包裹体的研究显示,该矿床中 Au 的搬运形式以 $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 为主(柴社立,1989;赵海玲等,1997)。当金属硫化物大量沉淀时(第 2、3 矿化阶段),流体的硫活度下降,使得上述化学反应的平衡被破坏,反应向左移而造成 Au 在石英中沉淀。同时,硫化物的沉淀造成硫化物周围 S 浓度降低, $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 会向硫化物附近迁移,并发生如下反应: $[\text{Au}(\text{HS})_2]^- + \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Au} + \text{FeS}_2 + \text{H}^+ + 1/2\text{H}_2\text{O}$,释放出 S,并造成金在黄铁矿表面吸附沉淀。金属硫化物以及 Au 和 Ag 的沉淀促使 Te 可与 Bi 结合形成碲铋矿而沉淀,进而出现了碲铋矿与银金矿共生及嵌生的现象。

Fe、S、As、Ga、Ge、In、Cd 等元素在黄铁矿、黄铜

矿、闪锌矿、方铅矿中的分配遵循元素地球化学亲和性以及类质同象原理。总体来看,S 元素存在的形式经历了 $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{HS}^- \rightarrow \text{S}^{2-}$ 、 $\text{S}_2^{2-} \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$ 的变化过程。随着温度下降, H_2S 在流体中的溶解度增大并分解成 HS^- , HS^- 可继续分解成 S^{2-} , S^{2-} 、 S_2^{2-} 与 Fe、Cu、Pb、Zn 等结合形成黄铁矿等硫化物而沉淀。硫逸度的持续下降使得 Te 与 Bi 结合形成碲铋矿。

在成矿末期,成矿环境从还原环境转变成氧化环境,S 以 SO_4^{2-} 形式存在, CO_2 在流体中的溶解度升高而开始沉淀出重晶石、方解石、白云石以及菱铁矿等矿物,并发育碳酸盐化围岩蚀变。

依据金属矿物共生组合、闪锌矿中 FeS 和 Fe 的含量以及银金矿中金的成色等,笔者推断峪耳崖金矿床为中深成中温矿床。方铅矿中较高的 Ag 含量说明该矿床的形成可能与岩浆活动有关,碲铋矿的出现则暗示了该矿床的成矿物质可能来自深源。

综上所述,似可得出结论如下:峪耳崖金矿床为中深成中温岩浆热液型金矿床。其成矿期可分为 4 个矿化阶段:石英-中粗粒黄铁矿矿化阶段,石英-细粒黄铁矿-碲铋矿-金矿化阶段,石英-多金属硫化物-碲铋矿-金矿化阶段,石英-黄铁矿-方解石矿化阶段。金主要在第 2、3 矿化阶段产出。碲铋矿与方铅矿、银金矿共生,与碲铋矿嵌生或被其包裹的银金矿,其金的成色高于黄铁矿中包裹的银金矿。碲铋矿的形成与 Au、Ag、Bi 元素的地球化学制约有关。在下一步的深部找矿工作中,可留意碲铋矿产出较多的石英脉以及 Te、Bi 元素富集的区域。

参考文献/References

- 柴社立. 1989. 河北省峪耳崖金矿床地质地球化学特征[J]. 长春地质学院学报,19(3):271-298.
- 陈柏林,吴淦国,叶德金,刘晓春,舒斌,杨农. 2000. 北山地区金矿床金的赋存状态和金矿物特征[J]. 矿物学报,20(3):242-248.
- 陈斌. 2009. 牛心山金矿床地质特征及成矿地质条件浅析[J]. 甘肃冶金,31(5):94-99.
- 谌剑,英基丰. 2005. 烟台金斗山金矿方铅矿的成因矿物学研究[J]. 山东国土资源,21(10):40-42.
- 董永慧. 2012. 河北峪耳崖花岗岩岩体特征及与成矿关系研究[硕士论文][D]. 导师:胡建中. 北京:中国地质大学. 46页.
- 范长福,李培斌,王志峰. 2011. 热液金矿床中黄铁矿特征[J]. 黑龙江科技信息(8):36.
- 郭福祺. 1988. 论金矿床中黄铁矿的某些标型特征与含金性的内在联系[J]. 陕西地质,6(1):1-7.

- 韩吟文,马振东. 2003. 地球化学[M]. 北京:地质出版社, 83-85.
- 廖显桂,陈克荣,陈小明. 1996. 河北峪耳崖花岗岩地球化学特征与成因[J]. 中山大学学报(自然科学版),35(2):137-140.
- 寇大明,黄菲,姚玉增,金成洙. 2010. 耿庄金矿床金矿物特征及其矿床成因意义[J]. 东北大学学报(自然科学版),31(1):123-126.
- 雷书浩. 1991. 冀东峪耳崖金矿床标型矿物石英的成因特征及找金[J]. 矿物岩石地球化学通报(3):144-146.
- 李颖,刘连登. 1999. 河北峪耳崖和牛心山金矿的对比研究及意义[J]. 黄金地质,5(2):9-12.
- 廖香俊,吴丹. 1998. 冀东峪耳崖金矿石英的标型特征[J]. 桂林工学院学报,18(4):330-333.
- 刘埃平,钟子川,唐建武. 1996. 四川石棉碛矿床地球化学特征研究[J]. 地球化学,25(4):365-371.
- 卢静文,彭晓蕾. 2010. 金属矿物显微镜鉴定手册[M]. 北京:地质出版社, 82-84.
- 罗镇宽,关康,王曼祉,王传泰. 1999. 中国某些金矿床中砷化物的特征[J]. 黄金地质,5(3):69-74.
- 罗镇宽,裘有守,关康,苗来成, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2001. 冀东峪耳崖和牛心山花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其意义[J]. 矿物岩石地球化学通报,20(4):279-284.
- 梅建明. 2000. 浙江遂昌冶岭头金矿床黄铁矿的化学成分标型研究[J]. 现代地质,14(1):51-55.
- 聂凤莲,赵天心,张蜀冀. 2003. 冀东一些金矿床金矿物特征及金成色地质意义[J]. 黄金地质,9(1):48-51.
- 牛树银,孙爱群,王礼胜,王宝德,王立峰,赵明合,邵振国,蒋威,张富国,张继林. 2000. 冀东峪耳崖金矿成矿控矿构造研究[J]. 地球学报,21(3):236-243.
- 戚龙水,孟祥元. 1999. 峪耳崖金矿的地质特征研究[J]. 黄金,20(7):12-14.
- 邱检生,王德滋,任启江,徐兆文. 1994. 河北宽城峪耳崖金矿床地质地球化学特征及成矿物质来源[J]. 矿床地质,13(2):137-146.
- 曲以秀,刘志国. 1995. 冀东燕山期花岗岩成因及其与金矿化的关系[J]. 长春地质学院学报,25(4):393-398.
- 任广智,赵玉锁,肖振,卿敏,魏峰,缪振平. 2010. 河北峪耳崖金矿床矿体赋存规律及找矿预测[J]. 黄金科学技术,18(4):27-28.
- 舒斌,王平安,董法先,李中坚. 2006. 海南乐东地区抱伦金矿矿石特征及其成因矿物学意义[J]. 地质通报,25(6):745-754.
- 司荣军,顾雪祥,周登诗,高鹏,杨升歧. 2006. 分散元素——金矿床中应引起注意的地球化学信息[J]. 地质与勘探,42(1):68-71.
- 汤云晖,袁万明,韩春明,董金泉,王世成. 2003. 峪耳崖金矿的成矿时代裂变径迹研究[J]. 地球学报,24(6):573-578.
- 王奎仁. 1989. 地球与宇宙成因矿物学[M]. 合肥:安徽教育出版社, 105-106.
- 王濮,潘兆樵,翁玲宝,等. 1982. 系统矿物学[M]. 北京:地质出版社, 242-291.
- 王自力,牛树银,陈超,孙爱群,王宝德,徐传诗. 2008. 冀东峪耳崖金矿成矿物质来源探讨[J]. 地质找矿论丛,23(2):36-41.
- 吴丹,廖香俊. 1998. 峪耳崖金矿黄铁矿的标型特征研究[J]. 矿产与地质,12(2):183-187.
- 谢家东,钱汉东,李永徽. 2000. 山东省平邑归来庄碛型金矿床碛元素地球化学特征及成矿机制探讨[J]. 地质找矿论丛,15(2):133-140.
- 徐国风,邵洁涟. 1979. 方铅矿的元素混入物研究及标型特征[J]. 地质地球化学(2):37-42.
- 徐万臣. 2006. 辽宁红石砬子金银矿床中金银矿物标型特征及成因意义[J]. 地质与资源,15(3):187-190.
- 峪耳崖金矿. 2006. 峪耳崖金矿勘探报告[R]. 内部资料.
- 张景合,赵成合. 2000. 河北峪耳崖金矿控矿条件分析及成矿预测[J]. 北京地质(2):14-20.
- 张秋生,杨振升,高德玉,任红茂,等. 1991. 冀东金厂峪地区高级变质区地质与金矿床[M]. 北京:地质出版社, 445页.
- 赵海玲,邓晋福,狄永军,杨秋利,张继林. 1997. 河北峪耳崖金矿床成因及成矿模式[J]. 中国地质大学学报,22(3):275-277.
- 赵海玲,邓晋福,狄永军,赵世柯,杨秋利,张继林. 1998. 河北峪耳崖金矿花岗岩矿物学地球化学特征与岩浆演化[J]. 桂林工学院学报,18(3):233-236.
- 周文雅. 2001. 细脉浸染型金矿床中黄铁矿的标型特征及意义[J]. 岩矿测试,20(2):100-104.
- 朱笑青,黄艳,张乾,何玉良. 2005. 银和金的选择吸附实验研究及其意义[J]. 矿床地质,24(4):445-449.
- 朱永峰,安芳. 2010. 热液成矿作用地球化学:以金矿为例[J]. 地学前缘,17(2):45-49.
- Clayton R N, O'Neil J R and Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. Geophys. Res., B77:3057-3067.
- Taylor H P Jr. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. Econ. Geol., 69:843-883.