

文章编号:0258-7106 (2009) 02-0143-14

# 新疆阿希金矿矿床地质和地球化学研究<sup>\*</sup>

安芳, 朱永峰

(北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要** 阿希金矿是新疆西天山产出的一个大型浅成低温热液型金矿, 赋矿围岩为晚泥盆世火山岩, 矿体以石英脉型为主, 其热液成矿期由以下4个阶段组成: 玉髓状石英阶段(I), 黄铁矿-石英阶段(II), 白铁矿-碳酸盐-石英脉阶段(III), 重晶石-碳酸盐脉阶段(IV), 其中阶段II和阶段III是主要的金成矿阶段, 银金矿为主要的含金矿物。从阶段II [195~285 °C,  $\log f(S_2) = 6.7 \sim -13$ ] 到阶段III [95~190 °C,  $\log f(S_2) = -15.8 \sim -25.6$ ], 成矿流体的温度和硫逸度明显降低。成矿流体与围岩作用导致流体中大离子亲石元素含量升高。阶段I ( $\delta Eu = 1.17 \sim 1.52$ ) 和阶段II ( $\delta Eu = 0.44 \sim 0.93$ ) 脉体的Eu异常和Eu含量区别显著, 表明阶段II成矿作用发生在相对还原的环境。阶段I脉体具有轻稀土元素强烈富集而重稀土元素相对亏损的稀土元素配分模式 ( $La/Yb = 4.5 \sim 36.2$ ), 而阶段II和阶段IV脉体轻重稀土元素分馏较弱 ( $La/Yb = 1.2 \sim 2.0$ ), 阶段IV重晶石-碳酸盐脉 ( $\sum REE = 67.5 \times 10^{-6}$ ) 以较高的稀土元素含量而区别于阶段II ( $\sum REE = 1.0 \times 10^{-6} \sim 4.2 \times 10^{-6}$ ), 说明重晶石和碳酸盐矿物对REE的分异有重要影响。不同阶段脉体与围岩火山岩的地球化学特征表明, 阶段I成矿流体以与火山岩围岩有关的火山热液为主, 进入阶段II, 大气水开始加入, 引起成矿流体温度和硫逸度强烈降低, 并导致金在阶段II和阶段III沉淀成矿。

**关键词** 地球化学; 成矿阶段; 阿希金矿; 西天山; 新疆

**中图分类号**: 618.51 **文献标志码**: A

## Geology and geochemistry of Axi gold deposit, Xinjiang

AN Fang and ZHU YongFeng

(Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, China; School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China)

### Abstract

The Axi gold deposit is a large epithermal gold deposit in West Tianshan Mountain of Xinjiang. Its ore-forming process can be divided into four stages, namely, chalcedony quartz stage (I), pyrite-quartz stage (II), marcasite-carbonate-quartz stage (III) and barite-carbonate stage (IV). Electrum occurs as the most important gold-bearing mineral. Stage II and III are the major periods for gold deposition. From Stage II [195~285 °C,  $\log f(S_2) = -6.7 \sim -13$ ] to Stage III [95~190 °C,  $\log f(S_2) = -15.8 \sim -25.6$ ], the temperature and sulfur fugacity of the ore-forming fluid decrease obviously. The reactions between the ore-forming fluid and the wall rocks caused the increase of LILE contents in the ore-forming fluid. The variations of Eu behaviors in veins formed at different stage suggest that Stage I vein crystallized in a rather oxidized fluid relative to Stage II vein. Stage I vein is strongly enriched in LREE ( $La/Yb = 4.5 \sim 36.2$ ) in comparison with veins formed at Stages II and IV ( $La/Yb = 1.2 \sim 2.0$ ). Stage IV vein ( $\sum REE = 67.5 \times$

<sup>\*</sup> 本文得到国家自然科学基金创新群体项目(批准号 40821002)和国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B08)的联合资助

第一作者简介 安芳, 女, 1984年生, 博士研究生, 矿床地球化学专业。

通讯作者 朱永峰, 教授, 博士生导师。Email: yfzhu@pku.edu.cn

收稿日期 2008-10-27; 改回日期 2009-02-26。李岩编辑。

$10^{-6}$ ) is different from Stage II vein ( $\sum\text{REE} = 1.0 \times 10^{-6} \sim 4.2 \times 10^{-6}$ ).  $\text{CO}_3^{2-}$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  are important in transporting and enriching REE in the ore-forming fluid. Geochemistry of volcanic rocks and veins formed at different stage suggests that the magmatic fluid was the primary ore-forming fluid, and meteoric water participated in the mineralization from Stage II to Stage IV, which caused obvious decrease of temperature and sulfur fugacity, and hence induced the electrum precipitation at Stages II and III.

**Key words:** geochemistry, ore-forming stage, Axi gold deposit, West Tianshan Mountains, Xinjiang

阿希金矿以其较大的金储量和独特的成矿方式引起了国内外众多研究者的关注,但众多研究主要集中于阿希金矿围岩火山岩的特征(沙德铭等, 2005; 翟伟等, 2006)及其与金矿化之间的关系(漆树基等, 1994; 马润泽等, 2000)、矿床地质特征(毋瑞身等, 1998; 贾斌等, 1999; 漆树基等, 2000)、热液蚀变和流体成矿作用(沙德铭, 1998; 贾斌等, 2001; 姜晓玮等, 2001; 鲍景新等, 2002; 冯娟萍等, 2005; 翟伟等, 2007)以及成矿流体地球化学(张作衡等, 2007)等多个方面,这些研究成果对探讨阿希金矿的成矿机制、指导找矿勘探具有重要意义。然而,关于阿希金矿成矿流体及其演化的研究相对较弱。热液作用所形成的矿物是研究热液矿床成矿流体最直接的样品,它记录了成矿流体的微量元素地球化学特征,其稀土元素地球化学特征可以很好地示踪成矿物质和成矿流体来源(Humphries, 1984; Zhu et al., 2001; 2006)。在前人工作的基础上,本文对阿希金矿矿床地质特征和成矿物理化学条件进行了详细研究,分析了不同热液阶段形成矿脉的微量元素组成,并以此探讨成矿流体的来源和演化。

## 1 区域地质

阿希金矿位于伊犁—中天山板块北缘博罗霍洛岛弧带的吐拉苏盆地中,盆地呈 NWW 向展布,南北分别以 NWW 走向的伊犁盆地北缘断裂和科古琴山南坡断裂为界(图 1)。吐拉苏盆地内广泛分布着奥陶纪灰岩(图 1),这些灰岩构成了盆地的基底。盆地盖层主要为晚古生代火山-沉积岩(图 1),其下伏地层为上泥盆统吐拉苏组粗碎屑岩,上覆地层为下石炭统阿恰勒河组滨-浅海相碎屑岩。吐拉苏盆地中断裂构造发育,以与盆地南北边缘断裂平行的 NWW 向次级断裂为主,这些 NWW 向的次级断裂与盆地南北边缘断裂一起,控制了区内火山-沉积岩的分布(图 1)。

吐拉苏盆地中的火山-沉积岩被命名为下石炭统“大哈拉军山组”。火山岩组合以不同粒度的火山碎屑岩为主,火山熔岩次之。火山碎屑岩主要为安山质凝灰岩(包括晶屑岩屑凝灰岩和玻屑凝灰岩)、火山角砾凝灰岩、火山角砾岩和沉凝灰岩。火山熔岩以流纹岩、英安岩和安山岩为主,玄武安山岩和玄武岩局部出现(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)。对阿希金矿区安山岩进行的锆石 SHRIMP 年代学研究表明,这套火山岩形成于晚泥盆世(363 Ma)而非早石炭世(翟伟等, 2006)。在阿希金矿西北的京希-伊尔曼德金矿区同样广泛分布“大哈拉军山组”火山-沉积岩地层,其中流纹岩的锆石 SHRIMP 年龄为 386 Ma(安芳等, 2008)。这些作者因此建议将吐拉苏盆地中广泛出露的泥盆纪火山-沉积岩从“大哈拉军山组”中分离出来,命名为“伊尔曼德组”(安芳等, 2008)。这类似中天山南缘的晚泥盆世火山-沉积岩,已经从所谓的“大哈拉军山组”中分离出并命名为“特克斯达坂组”(朱永峰等, 2006a),火山岩具典型大陆弧火山岩的地球化学特征(Zhu et al., 2005; 朱永峰等, 2006b; 王博等, 2006)。

## 2 矿床地质

阿希金矿位于吐拉苏盆地西段的火山-沉积岩中(图 1),火山岩剖面顶部的安山质岩石是主要的赋矿围岩。矿区发育与火山机构密切相关的爆发相、溢流相、火山通道相和次火山岩相岩石,构成一个古火山机构(图 2a, 毋瑞身等, 1996; 董连慧等, 2005)。火山机构中的放射状和环状断裂控制着矿体的分布,其中  $F_2$  弧形断裂(环状断裂的一部分,长约 1 000 m)是主要的控矿断裂(图 2a),控制着阿希金矿 90% 以上的矿体。矿区内发育成群与环状断裂伴生的 NW 向断裂,规模大小不等,其中分布着部分矿体(图 2a)。阿希金矿矿体呈脉状,沿走向延伸达上千米,厚度数米到数十米不等,沿倾向延伸至地下 300

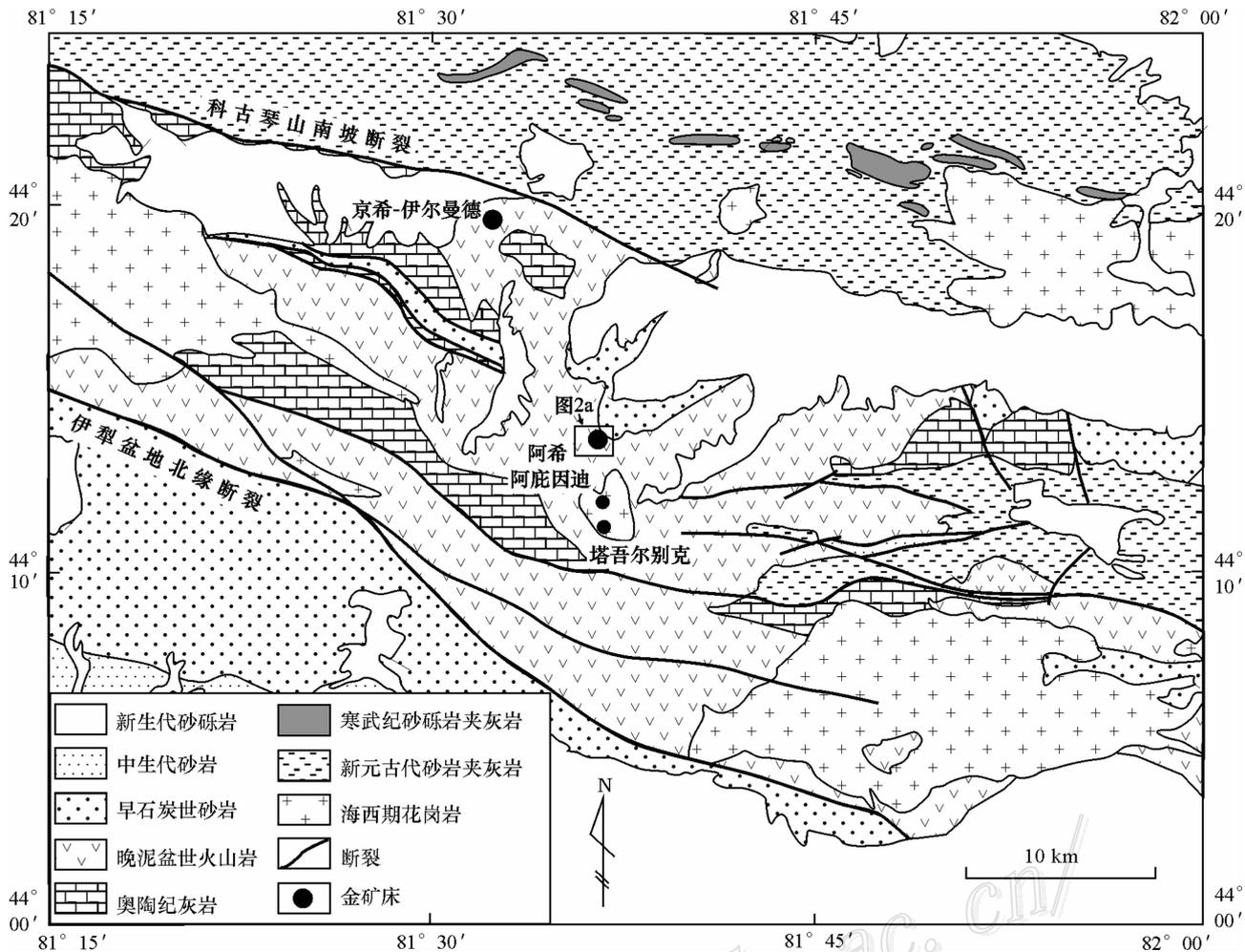


图 1 西天山吐拉苏盆地地质略图(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1988)

Fig. 1 Geological sketch map of Tulasu basin, West Tianshan (after Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, 1988)

~400 m,向深部逐渐变薄并出现分叉尖灭(图 2b)。矿体以石英脉型为主,少量蚀变岩型。矿石金品位为(3~8)g/t,常发育微晶结构、包含结构、交代结构,角砾状构造、细脉浸染状构造和梳状构造等。近矿围岩蚀变包括硅化、绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化和碳酸盐化,其中硅化和黄铁矿化与金矿化关系密切。

矿石中的脉石矿物有玉髓状石英、石英、钠长石、绢云母、方解石、铁白云石和菱铁矿等。玉髓状石英形成于热液演化早期,常被后期细粒石英脉穿切。钠长石与细粒石英伴生。绢云母主要呈浸染状分布于围岩中,少量与细粒石英共生产于矿脉中。方解石、铁白云石和菱铁矿主要形成于成矿中晚期,与细粒石英共生或与重晶石共生组成晚期重晶石-碳酸盐脉。主要矿石矿物包括黄铁矿、含砷黄铁矿、

毒砂、白铁矿、磁铁矿、闪锌矿、方铅矿、银金矿和黄铜矿,其中半自形-自形黄铁矿和含砷黄铁矿含量最高(图 3a、图 3b)。成矿早期阶段,黄铁矿和含砷黄铁矿( $w_{As}$  1.1%~2.3%,表 1)同时发育,含微量 Ag、Co、Ni、Cu( $w_B < 0.3%$ ,表 1)等,晚期以含砷黄铁矿为主,且含砷黄铁矿中 As 的含量( $w_{As}$  1.6%~7.8%,表 1)明显较早期含砷黄铁矿高,其中微量元素以 Co 和 Ni 为主(表 1),常与毒砂共生交代早期黄铁矿。毒砂主要为他形-半自形,呈浸染状分布于蚀变围岩中,与黄铁矿共生或交代黄铁矿(图 3b)。白铁矿大多呈竹叶状或针状与含砷黄铁矿和毒砂共生(图 3c),粒度相对较大(0.1~0.5 mm)。磁铁矿中 Cr 含量高,局部见其交代黄铁矿(图 3a)。方铅矿在矿石中仅零星分布,多呈他形被黄铁矿包裹或与黄铁矿和毒砂共生(图 3b)。闪锌矿(~0.1 mm)主

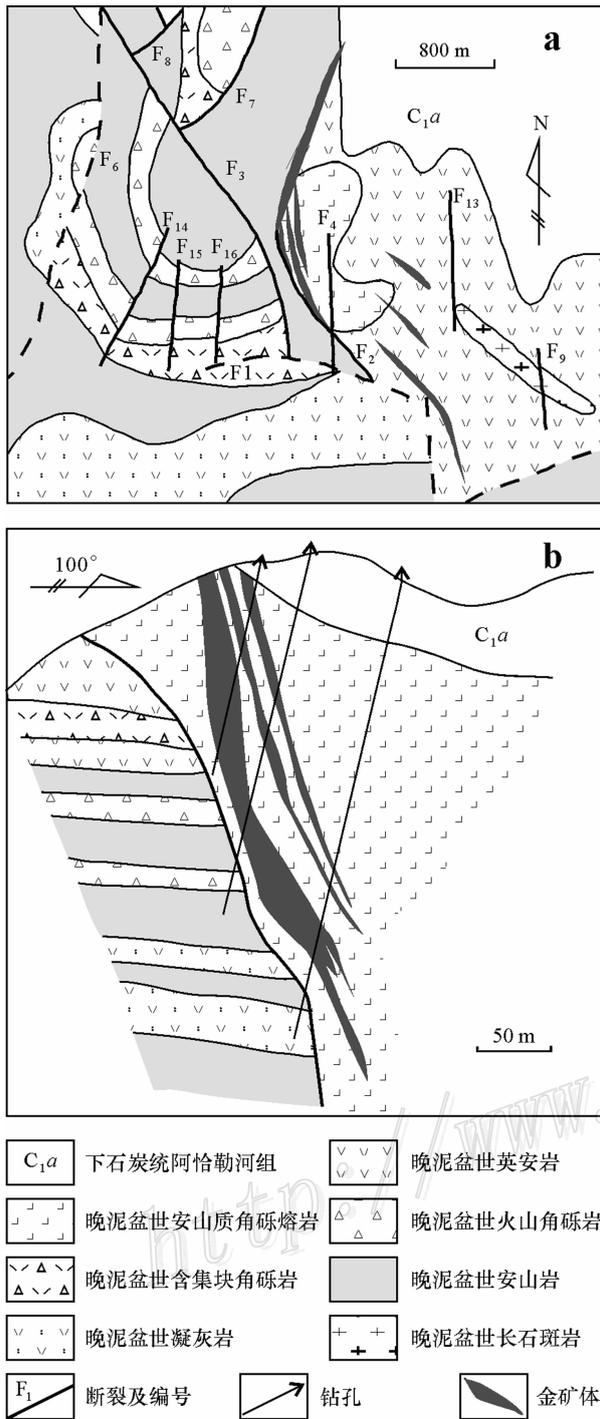


图2 a. 阿希金矿区地质图; b. 阿希金矿地质剖面图(据董连慧等, 2005)

Fig. 2 a. Geological map of the Axi gold deposit; b. Geological section of the Axi gold deposit (modified after Dong et al., 2005)

要形成于成矿中晚期,呈他形,与细粒方铅矿共生,部分闪锌矿出溶乳滴状黄铜矿,偶见闪锌矿交代黄铁矿,与毒砂共生(图 3d)或被含砷黄铁矿包裹(图

3e)。

银金矿是主要含金矿物,以他形粒状被含砷黄铁矿包裹或与含砷黄铁矿共生(图 3e、图 3h),局部见银金矿充填于含砷黄铁矿的裂隙中(图 3e),粒度为 10~30  $\mu\text{m}$ 。银金矿中  $w_{\text{Au}}$  71.74%~80.12%,  $w_{\text{Ag}}$  17.94%~27.12%,另含少量 Fe( $w_{\text{Fe}}$  0.07%~1.26%)和 Te( $w_{\text{Te}}$  0.01%~0.24%) (表 1)。Au 和 Ag 含量之间具有很好的负相关性,Te 与 Ag 具有弱正相关性,说明 Te 可能对富集 Ag 起作用。矿石中含少量辉锑银矿,与银金矿共生被含砷黄铁矿包裹(图 3h),其中  $w_{\text{Ag}}$  34.16%、 $w_{\text{S}}$  21.25% 和  $w_{\text{Sb}}$  39.36% (表 1)。

在前人研究的基础上,结合本文所观察到的不同类型矿脉之间的穿切关系和矿物共生组合,将阿希金矿热液成矿期划分为 4 个阶段(图 4),依次为玉髓状石英阶段(I):在围岩中大面积发生玉髓状硅化、绢云母化和绿泥石化,蚀变主要沿着围岩中的裂隙发生(呈脉状),或集中于围岩中的长石和角闪石斑晶上,形成的矿物主要为玉髓状石英、绢云母、绿泥石和少量黄铁矿。黄铁矿-石英脉阶段(II):是主要的金矿化阶段,形成烟灰色和灰白色含金石英脉,其中主要的脉石矿物为石英、绢云母、绿泥石和绿帘石,少量金红石和碳酸盐矿物,含大量自形-半自形黄铁矿和含砷黄铁矿,其次有少量毒砂、白铁矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿和黄铜矿等,银金矿主要充填于含砷黄铁矿的裂隙中或被含砷黄铁矿包裹(图 3e、图 3f),主要矿物组合为银金矿-黄铁矿-含砷黄铁矿。黄铁矿-石英阶段之后,经历了一次角砾化作用,导致早期形成的玉髓状石英和黄铁矿-石英脉破碎成角砾状,并被白铁矿-碳酸盐-石英阶段(III)形成的矿物胶结,从而见白铁矿-碳酸盐-石英脉穿切阶段 I 和阶段 II 形成的脉体。阶段(III)也是主要的金成矿阶段,主要矿物组成为石英、碳酸盐矿物(铁白云石、菱铁矿和方解石)、白铁矿、含砷黄铁矿和银金矿,另有少量辉锑银矿、磁铁矿和金红石,银金矿常与毒砂或辉锑银矿伴生被含砷黄铁矿包裹(图 3g、图 3h),该阶段形成的含砷黄铁矿中  $w_{\text{As}}$  (1.6%~7.8%, 表 1)明显高于阶段 II 含砷黄铁矿的  $w_{\text{As}}$  (1.1%~2.3%, 表 1),主要矿物组合为银金矿-白铁矿-含砷黄铁矿。重晶石-碳酸盐脉阶段(IV):碳酸盐矿物以方解石为主,铁白云石和菱铁矿次之,重晶石与碳酸盐矿物共生,该阶段无金属硫化物形成。

表 1 阿希金矿矿石中部分矿石矿物的电子探针分析结果  
Table 1 Representative compositions of sulfides in ores of the Axi gold deposit

测试矿物	阶段	$\omega_B/\%$															总和
		S	As	Fe	Mn	Pb	Ag	Co	Cd	Ni	Sb	Cu	Te	Zn	Au	Bi	
黄铁矿	II	52.04	0.22	45.87	0.01	0.00	0.05	0.07	n	0.02	n	0.00	0.07	0.00	0.06	0.00	98.41
黄铁矿	II	53.54	0.16	46.76	0.00	0.10	0.04	0.04	0.00	0.05	0.00	0.10	0.02	0.02	0.00	n	100.83
黄铁矿	II	53.35	0.22	46.94	0.00	0.00	0.03	0.07	0.03	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	n	100.72
黄铁矿	II	52.99	0.25	45.69	0.00	0.18	0.00	0.10	n	0.00	n	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	99.45
黄铁矿	II	52.09	0.66	46.27	0.00	0.02	0.03	0.10	n	0.00	n	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	99.24
黄铁矿	II	52.64	0.25	45.90	0.00	0.00	0.27	0.11	n	0.19	n	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	99.40
含砷黄铁矿	II	51.82	1.12	45.66	0.00	0.00	0.04	0.05	n	0.00	n	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	98.74
含砷黄铁矿	II	52.06	2.31	45.56	0.00	0.00	0.00	0.06	n	0.00	n	0.12	0.00	0.00	0.1	0.00	100.21
含砷黄铁矿	II	52.95	1.15	46.53	0.01	0.00	0.00	0.07	0.00	0.06	0.00	0.10	0.04	0.01	0.00	n	100.92
含砷黄铁矿	II	52.97	1.90	45.41	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.12	0.00	0.03	0.24	n	100.74
银金矿	II	0.08	0.00	1.05	0.06	0.00	25.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	72.04	n	99.01
银金矿	II	0.22	0.00	0.07	0.00	0.00	27.12	0.03	n	0.00	n	0.00	0.15	0.00	71.74	0.37	99.70
银金矿	II	0.18	0.00	0.81	0.00	0.00	21.69	0.00	0.00	0.00	0.01	0.09	0.09	0.00	76.22	n	99.09
银金矿	II	0.15	0.19	0.60	0.00	0.00	22.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	75.58	n	99.13
银金矿	II	0.12	0.02	0.67	0.00	0.00	17.94	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.11	0.00	80.12	n	99.01
银金矿	II	0.09	0.00	0.34	0.00	0.00	21.54	0.00	0.00	0.02	0.04	0.03	0.10	0.00	76.91	n	99.07
银金矿	II	0.06	0.00	0.22	0.00	0.00	24.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.24	0.00	74.50	n	99.06
毒砂	II	21.08	41.50	36.12	0.00	0.00	0.04	0.05	0.01	0.02	0.84	0.06	0.03	0.04	0.06	n	99.85
毒砂	II	22.73	39.61	36.14	0.02	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.53	0.04	0.00	0.02	0.00	n	99.15
毒砂	II	22.84	39.34	36.55	0.05	0.00	0.01	0.07	0.00	0.01	0.48	0.01	0.06	0.05	0.08	n	99.55
毒砂	II	21.97	40.64	35.59	0.04	0.01	0.04	0.07	n	0.00	n	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	98.39
毒砂	II	22.06	40.90	35.54	0.01	0.00	0.01	0.05	n	0.00	n	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	98.62
闪锌矿	II	32.89	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.04	0.03	0.00	65.83	0.00	n	99.00
闪锌矿	II	33.16	0.03	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.03	0.00	0.00	66.73	0.19	n	100.43
闪锌矿	II	33.47	0.00	0.12	0.03	0.08	0.00	0.01	0.14	0.02	0.00	0.01	0.01	66.30	0.31	n	100.50
闪锌矿	II	32.46	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.05	0.07	0.02	66.40	0.07	n	99.35
闪锌矿	II	32.85	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.02	0.01	0.00	0.01	66.05	0.13	n	99.49
闪锌矿	II	33.31	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.06	66.13	0.19	n	99.84
闪锌矿	II	33.06	0.00	0.08	0.01	0.00	0.00	0.02	0.24	0.00	0.00	0.03	0.06	66.31	0.00	n	99.81
含砷黄铁矿	III	52.14	1.57	46.12	0.03	0.00	0.00	0.06	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	n	99.94
含砷黄铁矿	III	51.59	2.27	45.82	0.02	0.00	0.00	0.08	n	0.00	n	0.07	0.01	0.04	0.16	0.00	100.06
含砷黄铁矿	III	50.52	2.94	45.89	0.00	0.00	0.00	0.06	n	0.01	n	0.04	0.02	0.00	0.01	0.00	99.49
含砷黄铁矿	III	50.72	2.22	45.81	0.01	0.00	0.02	0.09	n	0.02	n	0.03	0.02	0.00	0.17	0.07	99.17
含砷黄铁矿	III	48.97	7.81	42.37	0.01	0.01	0.00	0.09	n	0.07	n	0.02	0.07	0.00	0.00	0.00	99.42
含砷黄铁矿	III	50.26	4.40	45.02	0.02	0.00	0.00	0.07	n	0.00	n	0.04	0.00	0.02	0.00	0.00	99.83
黄铁矿	III	53.31	0.12	46.72	0.00	0.06	0.00	0.09	0.00	0.26	0.00	0.07	0.01	0.01	0.00	n	100.65
黄铁矿	III	53.52	0.02	46.69	0.00	0.00	0.02	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	n	100.34
黄铁矿	III	53.32	0.04	46.74	0.00	0.00	0.05	0.11	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	n	100.32
黄铁矿	III	53.43	0.63	46.17	0.00	0.00	0.03	0.06	0.01	0.05	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	n	100.40
银金矿	III	0.06	0.03	1.26	0.00	0.00	23.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	73.99	n	99.31
银金矿	III	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	21.16	0.02	0.00	0.03	0.00	0.02	0.01	0.00	78.48	n	99.89
银金矿	III	0.06	0.02	1.03	0.00	0.00	21.11	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.13	0.00	77.36	n	99.72
银金矿	III	0.00	0.03	0.20	0.00	0.00	22.31	0.07	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	77.32	n	100.01
银金矿	III	0.00	0.05	0.12	0.00	0.00	22.72	0.00	0.05	0.01	0.00	0.00	0.16	0.00	76.01	n	99.12
辉铋银矿	III	21.25	0.85	1.49	0.00	0.00	34.16	0.00	0.00	0.00	39.36	1.47	0.00	0.02	0.00	n	98.60
毒砂	III	22.80	39.17	36.80	0.06	0.00	0.05	0.06	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.01	0.00	n	99.08
毒砂	III	25.57	37.24	36.92	0.03	0.00	0.00	0.04	0.05	0.00	0.36	0.03	0.00	0.04	0.04	n	100.32
毒砂	III	25.84	37.35	37.44	0.02	0.00	0.00	0.08	0.00	0.02	0.07	0.03	0.00	0.00	0.14	n	100.99
闪锌矿	III	33.05	0.03	3.87	0.02	0.00	0.00	0.02	0.04	0.04	0.08	0.19	0.00	62.99	0.42	n	100.75
闪锌矿	III	33.41	0.00	1.91	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	0.02	0.00	0.60	0.00	63.37	0.57	n	99.96
闪锌矿	III	34.36	0.02	7.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.10	0.03	58.37	0.58	n	100.82
闪锌矿	III	33.69	0.09	4.27	0.03	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.08	0.10	0.01	61.41	0.41	n	100.16

北京大学地球与空间科学学院电子探针实验室分析, 仪器为 JEOL JXA-8100, 电子束直径  $1\ \mu\text{m}$ , 加速电压  $20\ \text{kV}$ , 束流  $1 \times 10^{-8}\ \text{A}$ 。n 为未检出。

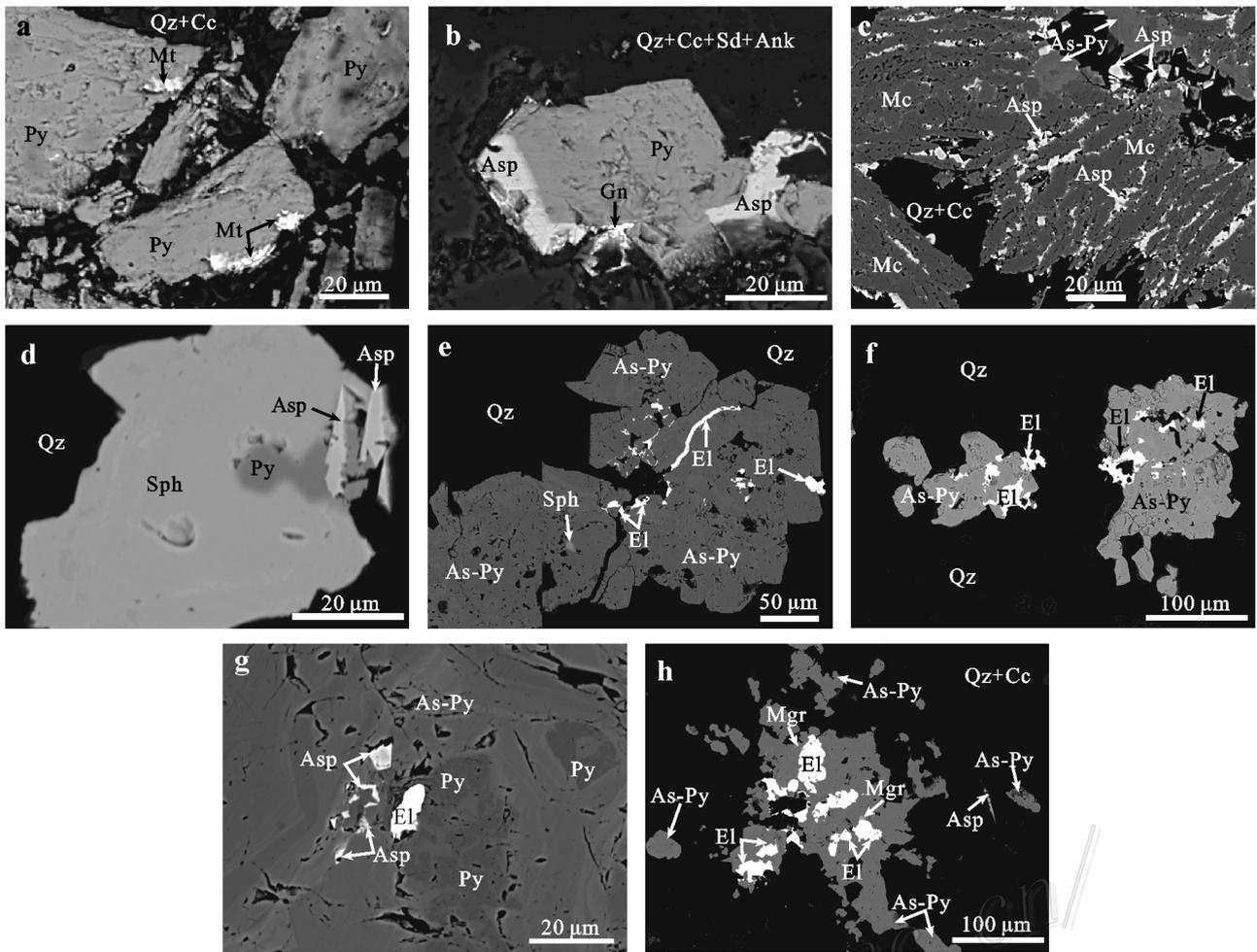


图3 阿希金矿中部分矿物的产出形式,背散射图像(BSE)

a. 阶段Ⅲ磁铁矿交代自形-半自形黄铁矿; b. 阶段Ⅱ毒砂交代自形黄铁矿,方铅矿与毒砂、黄铁矿共生; c. 阶段Ⅲ白铁矿与含砷黄铁矿、毒砂共生; d. 阶段Ⅲ闪锌矿交代黄铁矿,与毒砂共生; e. 阶段Ⅱ含砷黄铁矿包裹闪锌矿,其裂隙及颗粒间隙有银金矿充填; f. 阶段Ⅱ含砷黄铁矿与银金矿共生或包裹银金矿; g. 阶段Ⅲ含砷黄铁矿交代黄铁矿,包裹毒砂和银金矿; h. 阶段Ⅲ含砷黄铁矿包裹共生的银金矿和辉锑银矿。矿物代号: Ank—铁白云石, As-Py—含砷黄铁矿, Asp—毒砂, Cc—方解石, El—银金矿, Gn—方铅矿, Mc—白铁矿, Mgr—辉锑银矿, Mt—磁铁矿, Qz—石英, Sd—菱铁矿, Sph—闪锌矿

Fig. 3 BSE images showing minerals in ores of the Axi gold deposit

a. Magnetite replacing euhedral-subhedral pyrite, Stage III; b. Arsenopyrite replacing euhedral pyrite, galena coexistent with arsenopyrite and pyrite, Stage II; c. Marcasite coexistent with arsenian pyrite and arsenopyrite, Stage III; d. Sphalerite replacing pyrite, coexistent with arsenopyrite, Stage III; e. Arsenian pyrite enclosing sphalerite, electrum filling fractures of arsenian pyrite, Stage II; f. Arsenian pyrite coexistent with or enclosing electrum, Stage II; g. Arsenian pyrite replacing pyrite, enclosing arsenopyrite and electrum, Stage III; h. Arsenian pyrite enclosing associated electrum and miargyrite, Stage III. Ank—Ankerite, As-Py—Arsenian pyrite, Asp—Arsenopyrite, Cc—Calcite, El—Electrum, Gn—Galena, Mc—Marcasite, Mgr—Miargyrite, Mt—Magnetite, Qz—Quartz, Sd—Siderite, Sph—Sphalerite

### 3 地球化学

在阿希金矿区采集有代表性的矿石,选取其中的阶段 I、阶段 II 和阶段 IV 脉体进行全岩微量元素地球化学分析(阶段 III 脉体由于选样困难,未进行相应

分析)。样品经过 2 次破碎和挑选后,用蒸馏水清洗,在不锈钢钵中破碎至 60 目,再用玛瑙钵研磨至 200 目以下。微量元素用 ICP-MS 仪器测试,测试精度随着含量变化而变化,含量高于  $100 \times 10^{-6}$  时精度范围为 2%~5%,含量在  $(20 \sim 100) \times 10^{-6}$  时精度为 2%~10%,当含量小于  $20 \times 10^{-6}$  时测试精度为 5%~20%,具体测试方法见 Zhu 等(2006)。

表 2 阿希金矿不同阶段脉体的微量元素及稀土元素含量

Table 2 Representative compositions of trace elements and REE in ore samples from the Axi gold deposit

元素及特征值	$\tau_{\text{B}}/10^{-6}$						
	阶段 I 玉髓状石英脉			阶段 II 黄铁矿-石英脉			阶段 IV 重晶石-碳酸盐脉
	AX3	07AX5b	07AX24	AX6-2	AX7-1	AX9-1	07AX5a
Zn	9.94	24.54	23.27	29.50	79.35	12.60	60.72
V	0.91	1.70	1.35	2.14	106.50	5.71	10.17
Cr	268.5	233.5	245.0	359.6	270.5	305.5	37.09
Co	0.60	0.79	0.85	2.88	1.52	2.03	3.59
Ni	3.44	22.85	2.38	31.54	25.38	6.97	33.96
Cu	5.66	3.89	3.57	3.77	14.63	10.82	19.41
Cs	0.67	3.11	4.66	2.65	1.35	4.97	0.04
Rb	0.63	3.28	4.38	2.50	3.05	4.67	0.40
Ba	3.55	345.80	10.13	2.79	5.70	20.45	61.01
Th	0.07	0.03	0.07	0.09	0.19	0.15	0.04
U	0.03	0.02	0.02	0.91	0.13	0.22	0.01
Ta	0.01	0.002	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Nb	0.09	0.04	0.11	0.13	0.10	0.27	0.06
La	0.09	0.34	0.50	0.13	0.56	0.58	3.68
Ce	0.12	0.89	0.81	0.29	1.17	1.11	22.06
Pb	0.95	1.32	0.67	1.56	3.36	1.47	29.96
Sr	3.06	16.14	13.27	9.06	38.07	27.70	219.70
Zr	1.22	0.80	3.51	2.06	2.36	7.02	0.54
Hf	0.03	0.02	0.07	0.07	0.05	0.17	0.04
Y	0.17	0.68	0.22	0.50	0.44	2.24	27.62
La	0.09	0.34	0.50	0.13	0.56	0.58	3.68
Ce	0.12	0.89	0.81	0.29	1.17	1.11	22.06
Pr	0.02	0.16	0.11	0.05	0.20	0.17	3.99
Nd	0.08	0.76	0.36	0.18	0.73	0.71	17.70
Sm	0.02	0.18	0.04	0.03	0.15	0.17	4.05
Eu	0.01	0.10	0.02	0.01	0.02	0.07	1.04
Gd	0.04	0.22	0.06	0.06	0.13	0.33	4.20
Tb	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.06	0.68
Dy	0.03	0.14	0.03	0.09	0.09	0.43	4.34
Ho	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.08	0.82
Er	0.02	0.04	0.02	0.05	0.03	0.24	2.23
Tm	0.003	0.005	0.002	0.01	0.01	0.03	0.31
Yb	0.01	0.02	0.01	0.05	0.04	0.19	2.13
Lu	0.003	0.002	0.003	0.005	0.005	0.03	0.29
$\Sigma$ REE	0.45	2.91	1.97	0.98	3.17	4.21	67.52
$\delta$ Eu	0.75	1.52	1.17	0.67	0.44	0.93	0.77
$\delta$ Ce	0.61	0.92	0.78	0.86	0.83	0.84	1.23
(La/Yb) <sub>N</sub> *	4.46	9.75	36.24	1.61	10.14	2.01	1.16

\* 单位为 1。测试工作在核工业北京地质研究院高分辨电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)上完成。

测试结果列于表 2,并表示于图 5 和图 6 中。

阶段 I 脉体中 Zn、V、Ni、Co 和 Cu 等金属元素的含量明显较阶段 II 和阶段 IV 低(表 2)。各阶段脉体的原始地幔标准化多元素图解变化不大(图 5),均表现出明显 Cs、U 和 Pb 富集,其中阶段 II 脉体 U 含量高于阶段 I 和阶段 IV,Pb 的富集程度从阶段 I 到阶段 IV 逐渐增强。所有阶段 I (除 07AX5b)和阶段

II 样品均不同程度亏损 Ba 和 Rb,阶段 IV 脉体富集 Ba 而强烈亏损 Rb。各阶段脉体均具有 Nb、Ta、Zr 和 Hf 亏损的地球化学特征,但阶段 II 脉体 Nb、Ta、Zr 和 Hf 的亏损程度明显较阶段 I 和 IV 弱。

不同阶段脉体的稀土元素配分模式图解(图 6)表明,阶段 I 脉体具有轻稀土元素强烈富集而重稀土元素相对亏损的稀土元素配分模式(La/Yb=4.5

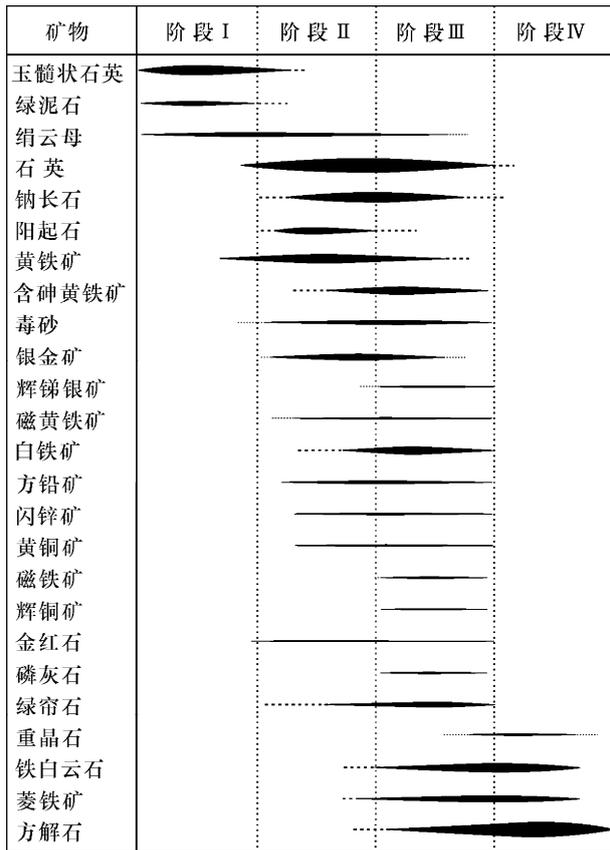


图4 阿希金矿成矿阶段及矿物生成顺序

Fig. 4 Ore-forming stages and formation sequence of minerals in the Axi gold deposit

~36.2), 阶段 II 和阶段 IV 脉体表现为轻重稀土元素分馏较弱的平坦型稀土元素配分模式( $La/Yb=1.2 \sim 2.0$ ), 阶段 IV 脉体( $\sum REE = 67.5 \times 10^{-6}$ )的稀土元素含量明显高于阶段 I 和阶段 II ( $\sum REE = 0.45 \times 10^{-6} \sim 4.2 \times 10^{-6}$ )。阶段 I 脉体(除样品 AX3)具有弱 Eu 正异常( $\delta Eu = 1.17 \sim 1.52$ ), 而阶段 II 和阶段 IV 脉体均表现为 Eu 负异常( $\delta Eu = 0.44 \sim 0.93$ )。阶段 I 和阶段 II 样品具有弱 Ce 负异常( $\delta Ce = 0.61 \sim 0.92$ )。前人分析了阿希金矿石英脉型矿石的稀土元素组成, 其稀土元素含量明显高于阶段 I 和阶段 II 石英脉, 安山岩围岩具有很高的稀土元素含量(图 6), 石英脉型矿石较阶段 I 和阶段 II 脉体高的稀土元素含量可能是由围岩混入所致。

## 4 讨论

### 4.1 成矿流体物理化学条件

毒砂中的 As 含量(原子百分比)与其形成温度

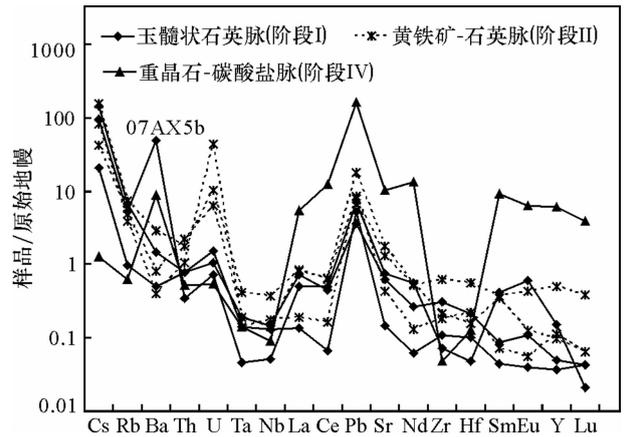


图5 阿希金矿不同阶段脉体的原始地幔标准化蛛网图解(标准化数据依据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 Primitive mantle normalized multi-element plots for veins formed at different stages (normalized values based on Sun et al., 1989)

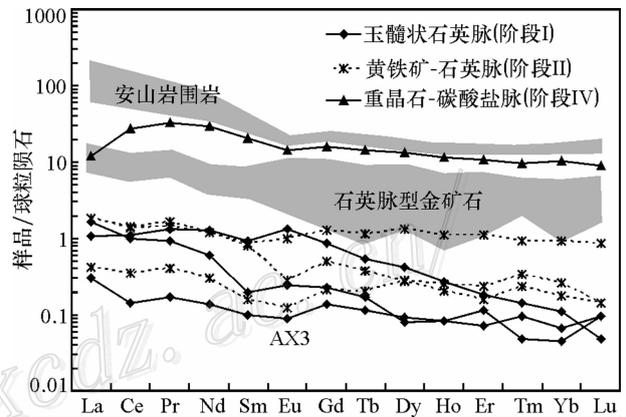


图6 阿希金矿不同阶段脉体的稀土元素配分模式图解(安山岩围岩数据引自王博等, 2006; 石英脉型矿体数据引自董连慧等, 2005)

Fig. 6 Chondrite-normalized rare earth element distribution patterns of veins formed at different stages (data of andesite from Wang et al., 2006, and data of quartz-vein type ore bodies from Dong et al., 2005)

有关(Kretschmar et al., 1976)。阿希金矿主要金成矿阶段(阶段 II 和 III)普遍发育毒砂, 根据毒砂成分温度计可以确定主要金成矿阶段的矿化温度。毒砂的电子探针成分数据(表 1)表明, 阶段 II 毒砂的 As 原子百分比为 27.7%~29.2%, 阶段 III 毒砂的 As 原子百分比为 25.2%~27.6%, 结合 Kretschmar 等(1976)实验所得的毒砂成分温度计详图, 可以确定阶段 II 毒砂的形成温度为 195~285 °C, 阶段 III 毒砂形成于 95~190 °C(图 7a)。毒砂在

整个阶段 II 和阶段 III 脉体中都有发育,其形成温度范围可以代表阶段 II 和阶段 III 时成矿流体的温度范围。因此阿希金矿主要金成矿阶段( II 和 III)的成矿温度为 95 ~ 285 °C,与前人(冯娟萍等 2005;沙德铭等,2005;翟伟等,2007;张作衡等,2007)根据流体包裹体数据获得的温度范围一致。从阶段 II 到阶段 III,成矿流体的温度明显降低。

闪锌矿形成于主要金成矿阶段( II 和 III,图 4),其中 FeS 的摩尔百分比与其形成环境的硫逸度有关

(Barton et al., 1979),可用于确定主要金成矿阶段成矿流体的硫逸度。根据电子探针成分数据(表 1)计算,阶段 II 和阶段 III 闪锌矿中 FeS 的摩尔百分比分别为 0.035% ~ 0.130% 和 0.00072% ~ 0.00210%,结合毒砂成分温度计所获得的成矿温度,可以确定阿希金矿阶段 II 和阶段 III 的硫逸度  $\log f(S_2)$  分别为 -6.7 ~ -13 和 -15.8 ~ -25.6(图 7b),说明从阶段 II 到阶段 III,成矿流体的硫逸度强烈降低。

### 4.2 成矿流体演化

阿希金矿围岩火山岩 CaO 和 TFeO 的含量随着蚀变程度增强而增大,而 K<sub>2</sub>O 含量随着蚀变程度增强而减小(图 8)。围岩 CaO 和 TFeO 含量与蚀变程度之间的相关关系主要由碳酸盐(方解石、铁白云石和菱铁矿)化引起。角闪石和黑云母在绿泥石化过程中会释放 K,围岩中角闪石和黑云母的绿泥石化可能是导致其中 K<sub>2</sub>O 含量随着蚀变程度增强而减小的主要原因,说明成矿流体与围岩相互作用过程中萃取围岩中的 K(大离子亲石元素),使得流体中 K 含量逐渐升高,流体包裹体数据表明阿希金矿成矿流体中阳离子以 K<sup>+</sup> 为主(沙德铭,1998;姜晓玮等,2001)。

Zn、Co、Cr、Ni 和 V 等金属元素主要赋存于金属矿物相中,阶段 I 脉体中仅含少量金属矿物(黄铁矿),因此其中金属元素含量明显较阶段 II 和阶段 IV 低(表 2)。各阶段脉体均不同程度富集 Cs、Ba、Pb、U 和 Sr 等大离子亲石元素(LILE,图 5),LILE 的活动性较强,易溶于流体,成矿流体与围岩相互作用过程中会逐渐萃取围岩中的 LILE。阶段 II 脉体中含大量黄铁矿和含砷黄铁矿(含微量 Pb,表 1),因此其中 Pb 富集程度明显高于阶段 I。阶段 IV 脉体中发育重晶石、方解石、铁白云石和菱铁矿,重晶石富含 Ba、Pb 可以以类质同象形式进入铁白云石和菱铁矿,而 Sr 和 Ca 具有相似的化学性质,可以在方解石中富集,因此阶段 IV 脉体具有相对阶段 I 和阶段 II 高的 Ba、Pb 和 Sr 含量。微量元素蛛网图解(图 5)表明,各阶段脉体均亏损 Nb、Ta、Zr 和 Hf 等高场强元素(HFSE),但这些元素在阶段 II 脉体中的含量明显高于阶段 I 和阶段 IV。HFSE 的活动性极弱,在蚀变过程中一般不发生迁移。在金红石中 HFSE 是相容元素,且 U 在金红石中的相容程度较其他 LILE 强(Klemme et al., 2005),阶段 II 脉体中发育金红石(图 4)是该阶段脉体 HFSE 和 U 含量相对较高的主要原因。

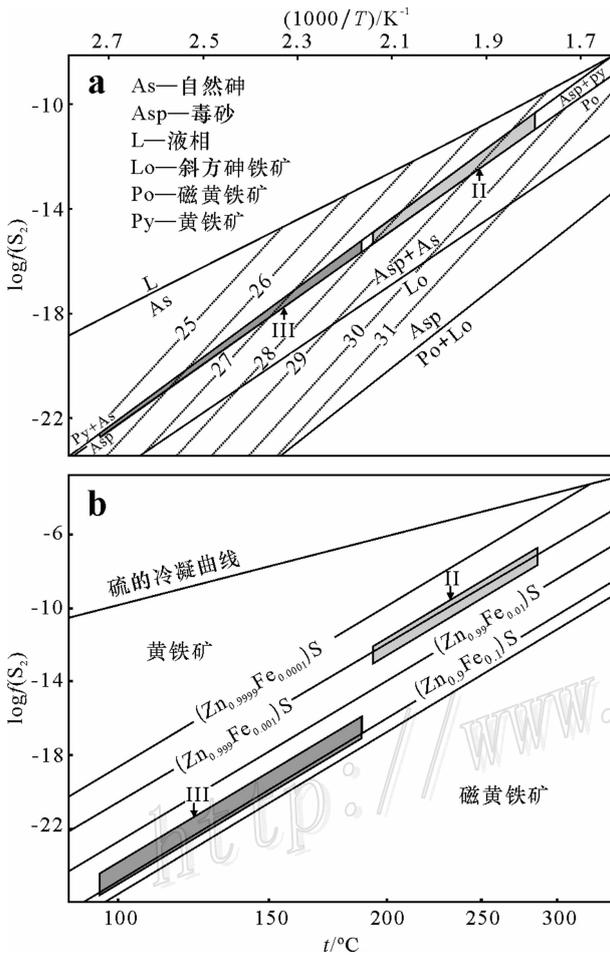


图 7 a. 根据 As 活度在毒砂稳定区域的投影所确定的阶段 II 和阶段 III 毒砂结晶温度(据 Kretschmar et al., 1976); b. 根据闪锌矿中 FeS 的摩尔百分比在黄铁矿、磁黄铁矿稳定区域投影所确定的阶段 II 和阶段 III 硫逸度范围(底图依据 Barton et al., 1979)

Fig. 7 a. Estimated crystallization temperatures of arsenopyrite on the basis of the projection of As activity in the stable field of arsenopyrite formed at Stages II and III (after Kretschmar et al., 1976); b. Estimated sulfur fugacity based on mol percentage of FeS in sphalerites formed at Stages II and III (after Barton et al., 1979)

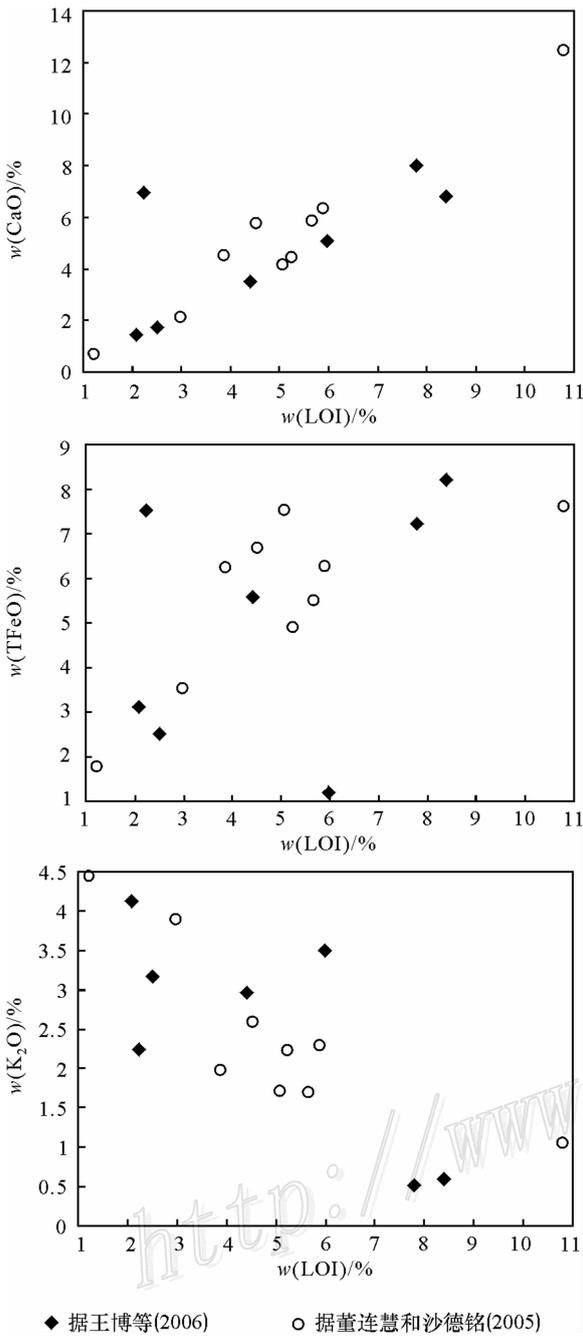


图8 阿希金矿围岩的烧失量与部分主要元素的相关关系图

Fig. 8 Plots of major element oxides versus LOI for host rocks of the Axi gold deposit. LOI is considered to be the alteration index

相对于微量元素,矿脉中矿物的稀土元素特征更能反应原始流体的特征(Kontak et al., 1999; Wood et al., 1994; German et al., 1999; Gu et al., 2007)。通过分析不同阶段热液矿物或脉体稀土元素组成,可以讨论成矿流体的来源及其演化(范

建国等,2000;李厚民等,2003;杨富全等,2007;陈懋弘等,2007)。脉体的Eu异常能够反应其形成时成矿流体的氧化还原状态,阶段I脉体以具有较低的 $Eu_N^*$  [= (Sm<sub>N</sub> + Gd<sub>N</sub>)/2]值和弱正Eu异常为主要特征,而阶段II脉体具有较高的 $Eu_N^*$ 值以及中等负Eu异常(图9),表明阶段II脉体中 $Eu^{2+}$ 含量高于阶段I,说明相对于阶段I,阶段II脉体形成于较还原的热液体系中,而阶段III发育磁铁矿说明从阶段II到阶段III,成矿流体从还原状态向氧化状态演化,阶段IV沉淀了重晶石而无金属硫化物形成表明阶段IV时成矿流体仍具有较强的氧化性。

稀土元素通常与 $Cl^-$ 、 $F^-$ 、 $OH^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $H_2PO_4^-$ 、 $CO_3^{2-}$ 或 $SO_4^{2-}$ 结合形成络合物在热液流体中进行运移(Haas et al., 1995)。阿希金矿阶段IV重晶石-碳酸盐脉中显著较高的稀土元素含量(图6,表2)说明成矿流体中 $CO_3^{2-}$ 和 $SO_4^{2-}$ 对于稀土元素的富集和运移起重要作用。重稀土元素与 $CO_3^{2-}$ 和 $SO_4^{2-}$ 结合的能力大于轻稀土元素(Haas et al., 1995),阿希金矿脉中碳酸盐和重晶石从阶段II末期逐渐开始发生沉淀,并导致重稀土元素的迁移能力降低,脉体中重稀土元素亏损程度减小,(La/Yb)<sub>N</sub>从高达36(阶段I)逐渐降低至1.2(阶段IV,表2)。

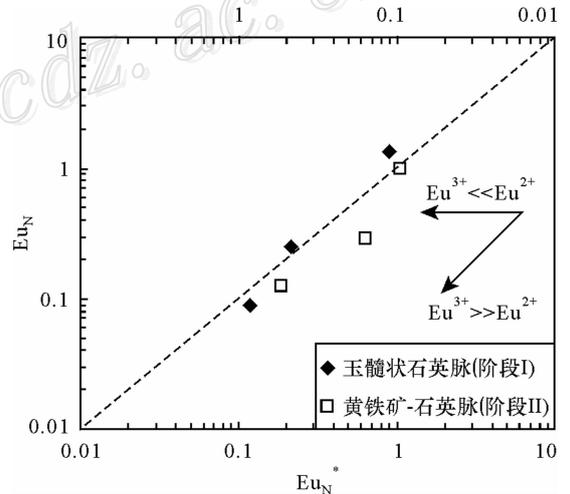


图9 阶段I和阶段II脉体在 $Eu_N$ - $Eu_N^*$ 图中的分布,其中 $Eu_N$ 为球粒陨石标准化的Eu浓度, $Eu_N^*$  = (Sm<sub>N</sub> + Gd<sub>N</sub>)/2,虚线表示 $Eu/Eu^* = 1$  (据 Ghaderi et al., 1999)

Fig. 9 Plot of chondrite-normalized Eu concentrations ( $Eu_N$ ) versus calculated  $Eu_N^*$  values, where  $Eu_N^* = (Sm_N + Gd_N)/2$ , for veins formed at Stage I and Stage II (after Ghaderi et al., 1999)

在不同阶段脉体与火山岩围岩稀土元素变异图解(图 10)中,阶段 I 脉体和火山岩显示连续变化的

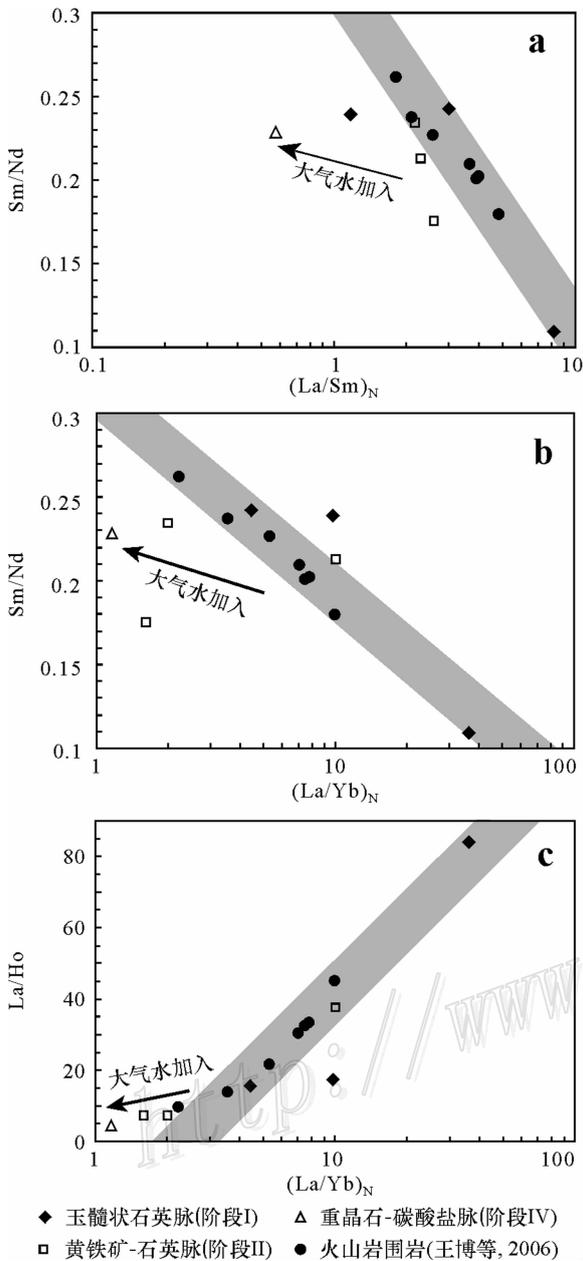


图 10 阶段 I、阶段 II 和阶段 IV 脉体以及火山岩围岩的稀土元素变异图解

a.  $Sm/Nd-(La/Sm)_N$  变异图解; b.  $Sm/Nd-(La/Yb)_N$  变异图解; c.  $La/Ho-(La/Yb)_N$  变异图解。火山岩围岩数据依据王博等(2006)

Fig. 10 a. Plot of  $Sm/Nd$  versus  $(La/Sm)_N$  for veins of Stages I, II and IV; b.  $Sm/Nd$  versus  $(La/Yb)_N$  diagram for volcanic host rock and veins of Stages I, II and IV; c.  $La/Ho$  versus  $(La/Yb)_N$  plot for volcanic host rocks and veins of Stages I, II and IV. Data of volcanic host rock from Wang et al. (2006)

趋势,而阶段 II 和阶段 IV 脉体却明显偏离火山岩和阶段 I 脉体的变化趋势。 $Sm/Nd-(La/Sm)_N$ 、 $Sm/Nd-(La/Yb)_N$  和  $La/Ho-(La/Yb)_N$  图解(图 10)显示,阶段 II 和阶段 IV 脉体偏离阶段 I 和火山岩围岩的演化趋势,向  $Sm/Nd$  比值增大、 $La/Ho$  比值减小的方向演化。而  $CO_3^{2-}$  和  $SO_4^{2-}$  与 Nd 结合的能力大于 Sm,与 Ho 结合的能力大于 La(Hass et al., 1995),重晶石和碳酸盐沉淀会导致脉体的  $Sm/Nd$  和  $La/Ho$  比值减小,因此阶段 II 和 IV 脉体偏离火山岩和阶段 I 脉体演化趋势的现象不能仅仅用重晶石和碳酸盐沉淀来解释,另一种流体加入可能对各阶段脉体的元素比值变化起着一定作用。前人通过石英氢、氧同位素研究(毋瑞身等,1998;沙德铭等,2005)认为阿希金矿的成矿流体以大气水为主,并有少量岩浆水参与。结合本文的微量元素地球化学研究,推断阿希金矿原始成矿流体为与围岩火山岩有关的火山热液,流体演化至阶段 II 时,大气水开始加入,导致阶段 II 和阶段 IV 脉体在  $Sm/Nd-(La/Sm)_N$ 、 $Sm/Nd-(La/Yb)_N$  和  $La/Ho-(La/Yb)_N$  变异图解中偏离火山岩和阶段 I 脉体的演化趋势(图 10)。同时,大气水的加入可能是导致成矿流体温度和硫逸度明显降低(图 7)并诱发金沉淀的主要原因。

## 5 结 论

依据系统的岩相学研究,将阿希金矿的热液成矿期划分为 4 个阶段:玉髓状石英阶段(I)、黄铁矿-石英脉阶段(II)、白铁矿-碳酸盐-石英脉阶段(III)和重晶石-碳酸盐脉阶段(IV)。根据毒砂成分温度计确定阶段 II 温度为  $195\sim 285\text{ }^\circ\text{C}$ ,阶段 III 形成于  $95\sim 190\text{ }^\circ\text{C}$ 。闪锌矿中 FeS 的摩尔百分比表明阿希金矿阶段 II 和阶段 III 的  $\log f(S_2)$  值分别为  $-6.7\sim -13$  和  $-15.8\sim -25.6$ 。从阶段 II 到阶段 III,成矿流体的温度和硫逸度强烈降低。从阶段 I 到阶段 II,成矿流体向较还原状态演化,而从阶段 II 到阶段 IV,成矿流体的氧化性增强。阶段 I 脉体具有轻稀土元素富集型稀土元素配分模式,阶段 II 和阶段 IV 脉体具有轻重稀土元素分馏不明显的平坦型稀土元素配分模式,阶段 IV 脉体中稀土元素含量明显高于阶段 I 和阶段 II。成矿流体中  $CO_3^{2-}$  和  $SO_4^{2-}$  对稀土元素的运移起重要作用。阶段 I 时阿希金矿成矿流体以火山热液为主,阶段 II 时大气水开始加入,成矿流体的温度和硫逸度降低,导致金沉淀成矿。

志 谢 本研究得到国家自然科学基金创新群体项目(批准号 40821002)和“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B08)资助,北京大学古丽冰老师协助完成了样品的微量元素分析,舒桂明老师协助完成了矿物的电子探针分析,魏少妮参与了部分化学实验室的工作。野外工作得到阿希金矿有关领导和专家的大力支持,特此感谢。

## References

- An F and Zhu Y F. 2008. Study on trace elements geochemistry and SHRIMP chronology of volcanic rocks in Tulasu Basin, West Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2741-2748 (in Chinese with English abstract).
- Bao J X, Chen Y J, Zhang Z S, Chen H Y and Liu Y L. 2002. The preliminary study of laumontitization of Axi gold deposit and paleogeothermal minerogenetic fluid system in West Tianshan [J]. *Acta Scientiarum Naturalium, Universitatis Pekinensis*, 38(2): 252-259 (in Chinese with English abstract).
- Barton P B and Skinner B J. 1979. Sulfide mineral stabilities[A]. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* [C]. New York: Wiley. 278-403.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1988. Mineral resource of Salimu region in Xinjiang Uygur Autonomous Region [M]. Beijing: Chinese Geological Map Printing System(in Chinese).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. Regional geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Chen M H, Wu L L, Uttley P J, Norman T, Zheng J M and Qin Y Z. 2007. REE features of arsenian pyrite and vein quartz and their fluid inclusions in the Jinfeng (Lannigou) gold deposit, Guizhou Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2423-2433 (in Chinese with English abstract).
- Dong L H and Sha D M. 2005. Paleozoic epithermal gold deposits in Western Tianshan [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Fan J G, Ni P, Su W C, Qi L and Tian J H. 2000. Characteristics and significance of rare earth elements in quartz of Sidaogou hydrothermal gold deposit, Liaoning [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 587-590 (in Chinese with English abstract).
- Feng J P and Wang J L. 2005. Study on fluid inclusions and discussion on gold mineralization styles of Axi, Jingxi-Yelmand gold deposits in West Tianshan, Xinjiang[J]. *Northwestern Geol.*, 38(1): 31-36 (in Chinese with English abstract).
- German C R, Hergt J, Palmer M R and Edmond J M. 1999. Geochemistry of a hydrothermal sediment core from the OBS vent-field, 21 N East Pacific Rise [J]. *Chem. Geol.*, 155: 65-75.
- Ghaderi M, Palin J M, Campbell I H and Sylvester P. 1999. Rare earth element systematics in scheelite from hydrothermal gold deposits in the Kalgoorlie-Norseman region, Western Australia [J]. *Econ. Geol.*, 94: 423-438.
- Gu X X, Schulz O, Vavtar F, Liu J M, Zheng M H and Fu S H. 2007. Rare earth element geochemistry of Woxi W-Sb-Au deposit, Hunan Province, South China[J]. *Ore Geol. Rev.*, 31: 319-336.
- Haas J R, Shock E L and Sassani D C. 1995. Rare elements in hydrothermal systems: Estimates of standard partial molal thermodynamic properties of aqueous complexes of the rare earth elements at high pressures and temperatures [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59(21): 4329-4350.
- Humphries S E. 1984. The mobility of the rare earth elements in the crust [A]. In: Henderson P, ed. *Rare earth element geochemistry*[C]. Amsterdam: Elsevier. 315-341.
- Jia B, Wu R S, Tian C L and Sha D M. 1999. Characteristics of the Axi Late Paleozoic adularia-sericite type gold deposit, Xinjiang [J]. *J. Precious Metallic Geology*, 8(4): 199-208 (in Chinese).
- Jia B, Wu R S, Tian C L and Sha D M. 2001. The characters of the mineralization fluid of Axi gold deposit in Xinjiang[J]. *Gold Geol.*, 7(1): 39-46 (in Chinese).
- Jiang X W, Wang Y J and Cheng B. 2001. The characteristics of fluid of Axi type gold metallogenic series in west Tianshan Mountain[J]. *Earth Science Frontier*, 8(4): 277-280 (in Chinese with English abstract).
- Klemme S, Prowatke S, Hametner K and Gunther D. 2005. Partitioning of trace elements between rutile and silicate melts: Implications for subduction zones[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69(9): 2361-2371.
- Kontak D J and Jackson S J. 1999. Documentation of variable trace- and rare-earth-element abundances in carbonates from auriferous quartz veins in Meguma lode-gold deposits, Nova Scotia[J]. *The Canadian Mineralogist*, 37: 469-488.
- Kretschmar U and Scott S D. 1976. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application[J]. *The Canadian Mineralogist*, 14: 364-386.
- Li H M, Shen Y C, Mao J W, Liu T B and Zhu H P. 2003. REE features of quartz and pyrite and their fluid inclusions: An example of Jiaojia-type gold deposits, northwestern Jiaodong peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 267-274 (in Chinese with English abstract).
- Ma R Z and Wang R M. 2000. Paleo-volcanic apparatus and its controlling on mineralization in Axi gold field of Xinjiang[J]. *Xinjiang Geol.*, 18(3): 229-235 (in Chinese with English abstract).
- Qi S J and Li C H. 1994. Gold geochemistry and mineralization of the volcanic rocks of Dahalajunshan Formation in Axi[J]. *Xinjiang*

- Geol., 12(2): 139-145 (in Chinese with English abstract).
- Qi S J and Zhang G L. 2000. The characteristics and genesis of silicified-rock-type gold deposits in Tulasu, Yining[J]. Xinjiang Geol., 18(1): 42-50. (in Chinese with English abstract)
- Sha D M. 1998. Study on the fluid inclusion of Axi gold deposit in western Tianshan [J]. J. Precious Metallic Geology, 7(3): 180-188 (in Chinese).
- Sha D M, Jin C Z, Dong L H, Wu R S, Tian C L and Jia B. 2005. Study on the metallogenic geochemistry of Axi gold deposit in Western Tianshan Mountains [J]. Geology & Resources, 14(2): 118-125 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic study of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[M]. London: Geological Society of London, Special Publication, 42: 313-345.
- Wang B, Shu L S, Cluzel D, Faure M, Charvet J and Ma Q. 2006. Geochemical characteristics and tectonic significance of Carboniferous volcanic rocks in the northern part of the Ili Block, Xinjiang [J]. Geol. in China, 33(3): 498-508 (in Chinese with English abstract).
- Wood S A and Williams-Jones A E. 1994. The aqueous geochemistry of the rare-earth elements and yttrium. 4. Monazite solubility and REE mobility in exhalative massive sulfide-depositing environments[J]. Chem. Geol., 115: 47-60.
- Wu R S, Tian C L, Yang F L, Liu H S, Jia B and Sha D M. 1996. The outline of gold deposits in Axi area, Xinjiang [J]. J. Precious Metallic Geology, 5(1): 5-21 (in Chinese).
- Wu R S, Tian C L, Huang M Y, Cai H Y, Zhi Q H, Qi S J, Cao L H and Wang R S. 1998. Geological characteristics of the gold copper deposits in western Tianshan [J]. J. Precious Metallic Geology, 7(1): 1-18 (in Chinese).
- Yang F Q, Mao J W, Xu L G, Zhang Y, Liu F, Huang C L, Zhou G, Liu G R and Dai J Z. 2007. REE geochemistry of the Mengku iron deposit, Xinjiang, and its indication for iron mineralization [J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2443-2456 (in Chinese with English abstract).
- Zhai W, Sun X M, Gao J, He X P, Liang J L, Miao L C and Wu Y L. 2006. SHRIMP dating of zircons from volcanic host rocks of Dahalajunshan Formation in Axi gold deposit, Xinjiang, China, and its geological implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1399-1404 (in Chinese with English abstract).
- Zhai W, Sun X M, He X P, Su L W, Wu Y L and Dong Y X. 2007. Geochemistry of ore formation fluid and metallogenic mechanism of Axi low-sulfidation gold deposit in Xinjiang, China [J]. Acta Geologica Sinica, 81(5): 659-669 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z H, Mao J W, Wang Z L, Zuo G C, Chen W S, Zhu H P, Wang L S and Lü L S. 2007. Geochemistry of fluid inclusions in the Axi gold deposit, West Tianshan, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2403-2414 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y F, Zeng Y S and Jiang N. 2001. Geochemistry of the ore-forming fluids in gold deposits from the Taihang Mountains, Northern China [J]. International Geology Review, 43: 457-473.
- Zhu Y F, Zhang L F, Gu L B, Guo X and Zhou J. 2005. Study on trace elements geochemistry and SHRIMP chronology of Carboniferous lava, West Tianshan [J]. Chinese Science Bulletin, 50(19): 2201-2212.
- Zhu Y F, Zeng Y S and Gu L B. 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite no. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay Mountains, northwest China [J]. Asian Earth Sciences, 27: 61-77.
- Zhu Y F, Zhou J, Song B, Zhang L F and Guo X. 2006a. Age of the "Dahalajunshan" Formation in Xinjiang and its disintegration [J]. Geol. in China, 33(3): 487-497 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y F, Zhou J and Guo X. 2006b. Petrology and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in the Western Tianshan Mountains, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1341-1350 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 安 芳, 朱永峰. 2008. 西天山吐拉苏盆地火山岩 SHRIMP 年代学和微量元素地球化学研究[J]. 岩石学报, 24(12): 2741-2748.
- 鲍景新, 陈衍景, 张增森, 陈华勇, 刘玉琳. 2002. 西天山阿希金矿蚀沸石化与古地热成矿流体系统的初步研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 38(2): 252-259.
- 陈懋弘, 吴六灵, Uttley P J, Norman T, 郑建民, 秦运忠. 2007. 贵州锦丰(烂泥沟)金矿床含锗黄铁矿和脉石英及其包裹体的稀土元素特征[J]. 岩石学报, 23(10): 2423-2433.
- 董连慧, 沙德铭. 2005. 西天山地区晚古生代浅成低温热液金矿床 [M]. 北京: 地质出版社.
- 范建国, 倪 培, 苏文超, 漆 亮, 田京辉. 2000. 辽宁四道沟热液金矿床中石英的稀土元素的特征及意义[J]. 岩石学报, 16(4): 587-590.
- 冯娟萍, 王居里. 2005. 西天山阿希、京希-伊尔曼德金矿床成矿流体包裹体研究及矿化类型探讨[J]. 西北地质, 38(1): 31-36.
- 贾 斌, 毋瑞身, 田昌烈, 沙德铭. 1999. 新疆阿希晚古生代冰长石-绢云母型金矿床地质[J]. 贵金属地质, 8(4): 199-208.
- 贾 斌, 毋瑞身, 田昌烈, 沙德铭. 2001. 新疆阿希金矿浅成低温流体特征[J]. 黄金地质, 7(1): 39-46.
- 姜晓玮, 王永江, 程 博. 2001. 西天山阿希型金成矿系列的成矿流体特征[J]. 地学前缘, 8(4): 277-280.
- 李厚民, 沈远超, 毛景文, 刘铁兵, 朱和平. 2003. 石英、黄铁矿及其包裹体的稀土元素特征——以胶东焦家金矿为例[J]. 岩石学报, 19(2): 267-274.
- 马润泽, 王润明. 2000. 新疆阿希金矿区古火山机构及其控矿作用 [J]. 新疆地质, 18(3): 229-235.
- 漆树基, 李长河. 1994. 新疆阿希大哈拉军山组火山岩金元素地球化学特征及其成矿关系[J]. 新疆地质, 12(2): 139-145.

- 漆树基, 张桂林. 2000. 伊宁吐拉苏地区硅化岩型金矿床特征及成因[J]. 新疆地质, 18(1): 42-50.
- 沙德铭. 1998. 西天山阿希金矿流体包裹体研究[J]. 贵金属地质, 7(3): 180-188.
- 沙德铭, 金成洙, 董连慧, 毋瑞身, 田昌烈, 贾斌. 2005. 西天山阿希金矿成矿地球化学特征研究[J]. 地质与资源, 14(2): 118-125.
- 王博, 舒良树, Cluzel D, Faure M, Charvet J, 马前. 2006. 新疆伊犁北部石炭纪火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 33(3): 498-508.
- 毋瑞身, 田昌烈, 杨芳林, 刘海山, 贾斌, 沙德铭. 1996. 新疆阿希地区金矿概论[J]. 贵金属地质, 5(1): 5-21.
- 毋瑞身, 田昌烈, 黄明扬, 蔡宏渊, 植起汉, 漆树基, 曹洛华, 王润三. 1998. 西天山金、铜矿地质特征简述[J]. 贵金属地质, 7(1): 1-18.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1988. 新疆维吾尔自治区塞里木幅矿产图[M]. 北京: 中国地质图制印厂.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 杨富全, 毛景文, 徐林刚, 张岩, 刘锋, 黄成林, 周刚, 刘国仁, 代军治. 2007. 新疆蒙库铁矿出稀土元素地球化学及对铁成矿作用的指示[J]. 岩石学报, 23(10): 2443-2456.
- 翟伟, 孙晓明, 高俊, 贺小平, 梁金龙, 苗来成, 吴有良. 2006. 新疆阿希金矿床赋矿围岩——大哈拉军山组火山岩 SHRIMP 锆石年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(5): 1399-1404.
- 翟伟, 孙晓明, 贺小平, 苏丽薇, 吴有良, 董艺辛. 2007. 新疆阿希低硫型金矿床流体地球化学特征与成矿机制[J]. 地质学报, 81(5): 659-669.
- 张作衡, 毛景文, 王志良, 左国朝, 陈伟十, 朱和平, 王龙生, 吕林素. 2007. 新疆西天山阿希金矿床流体包裹体地球化学特征[J]. 岩石学报, 23(10): 2403-2414.
- 朱永峰, 周晶, 宋彪, 张立飞, 郭璇. 2006a. 新疆“大哈拉军山组”火山岩的形成时代问题及其解体方案[J]. 中国地质, 33(3): 487-497.
- 朱永峰, 周晶, 郭璇. 2006b. 西天山石炭纪火山岩岩石学及 Sr-Nd 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 22(5): 1341-1350.