

文章编号: 0258-7106 (2014) 03-0541-17

新疆萨 I 金矿床石英菱镁岩与金成矿作用研究^{*}

邱 添, 朱永峰^{**}

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

摘 要 新疆西准噶尔萨 I 金矿床由含金糜棱岩化石英菱镁岩和含金石英脉组成, 矿体围岩为石英菱镁岩、碳酸盐-滑石片岩和蛇纹岩。根据岩相学研究, 将萨 I 金矿床的形成过程划分为 5 个阶段: 黄铁矿-石英-碳酸盐阶段 (I)、自然金-辉砷镍矿-铬云母阶段 (II)、黄铁矿-碳酸盐-石英阶段 (III)、自然金-硫化物-石英阶段 (IV) 和碳酸盐阶段 (V)。阶段 I 和阶段 II 对应于石英菱镁岩经历的韧-脆性变形时期, 其他 3 个阶段形成于脆性变形期间, 反映出构造性质由挤压向拉伸环境转换的过程。阶段 II 和阶段 IV 分别对应于 Au-As 和 Au-Cu 成矿作用。金矿化与石英菱镁岩经历的剪切变形过程相关。含金糜棱岩化石英菱镁岩的微量元素含量明显高于未变形的石英菱镁岩, 说明剪切带流体输送了相关微量元素和成矿元素。在韧性变形向脆性变形转换过程中, 流体压力骤降, 含金络合物分解形成金矿。萨 I 金矿床是产在糜棱岩化石英菱镁岩中的严格受剪切带控制的热液脉型金矿床。

关键词 地质学 石英菱镁岩 黄铁矿 韧性剪切带 萨 I 金矿 西准噶尔

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Study on gold mineralization in listvenite of No. I Sartohay gold deposit, Xinjiang

QIU Tian and ZHU YongFeng

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

Abstract

The No. I Sartohay gold deposit is hosted by listvenite, carbonate-talc schist and serpentinite. The ores are composed of auriferous mylonitized listvenite and auriferous quartz vein. The ore-forming process can be divided into five stages: pyrite-quartz-carbonate stage (stage I), gold-gersdorffite-mariposite stage (II, Au-As mineralization), pyrite-carbonate-quartz stage (III), gold-chalcopyrite-quartz stage (IV, Au-Cu mineralization) and carbonate stage (V). Stage I and II occurred in the transition period from ductile to brittle deformation, and stage III to V occurred in the brittle deformation period. Gold mineralization is controlled by mylonitization. The content of trace elements in auriferous mylonitized listvenite is apparently higher than that in undeformed listvenite, which demonstrates that the fluid in the shear zone transported trace elements and metallogenic elements. The decrease of pressure from ductile to brittle deformation induced gold deposition.

Key words: geology, listvenite, pyrite, ductile shear zone, No. I Sartohay gold deposit, west Junggar

^{*} 本研究得到国家自然科学基金项目(编号: 41121062, 41372062)资助

第一作者简介 邱 添, 女, 1987 年生, 博士研究生, 矿床地球化学专业。Email: qiutian2010@126.com

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

收稿日期 2013-07-19; 改回日期 2013-04-05。张绮玲编辑。

萨尔托海 I 号金矿床(简称“萨 I 金矿”)位于新疆西准噶尔萨尔托海区域的东北部(图 1),赋存在石英菱镁岩中。石英菱镁岩(Listvenite,又名滑石菱镁片岩,根据矿物组合应该命名为“石英菱镁岩”)是一种用于描述各种碳酸盐化的基性-超基性岩的岩石。一般认为,石英菱镁岩是基性-超基性岩石热液蚀变的产物,以石英、碳酸盐(菱镁矿、铁白云石)、铬云母、少量浸染状黄铁矿和残余铬尖晶石等矿物组合为特征(Ploshko, 1965; Barnes et al., 1973; Halls et

al., 1995)。石英菱镁岩通常产于构造肢解的蛇绿混杂岩带,呈透镜状或脉状沿着区域主断裂带分布。前人曾将萨 I 金矿的围岩地层定为下石炭统火山-沉积建造,并根据矿区玄武岩中金背景值的对比分析以及矿石中硫化物的硫、铅同位素分析,认为萨 I 金矿的成矿物质主要来源于玄武岩,为中温变质热液充填交代型金矿(新疆有色金属地质勘探公司, 1986; 傅昆, 2004)或岩浆热液型金矿床(祝皆水, 1989; 吴佐飞, 1992; Robinson et al., 2005);还有

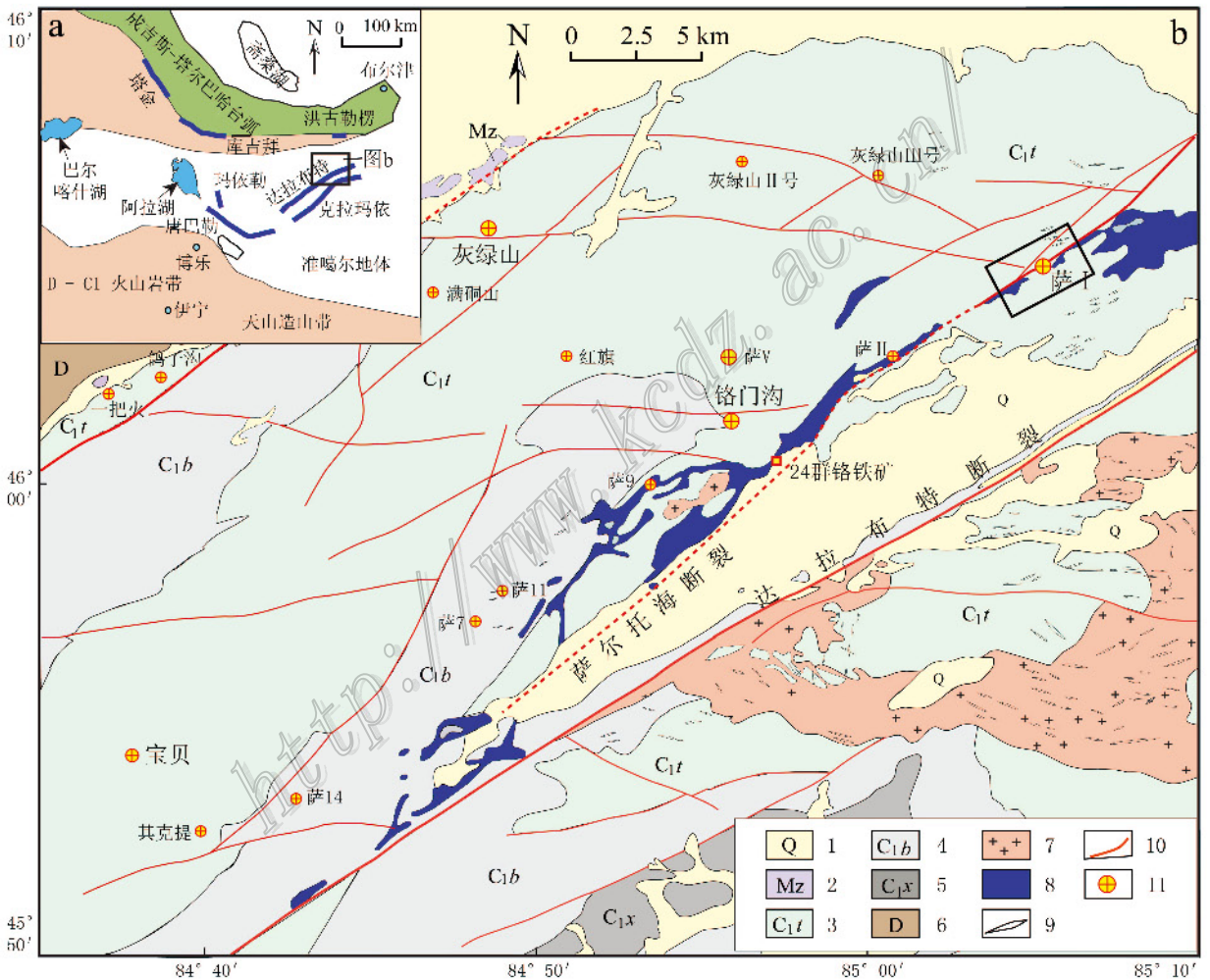


图 1 西准噶尔区域构造简图(a)、西准噶尔萨尔托海区域地质图(b)(据朱永峰等, 2013 修改)

1—第四系; 2—中生界砂岩、泥岩和砾岩; 3—下石炭统太勒古拉组, 主要岩性为中性火山岩、硅质岩和凝灰岩; 4—下石炭统包古图组, 主要岩性为凝灰质砂岩、凝灰质细砂岩; 5—下石炭统希贝库拉斯组, 主要岩性包括凝灰质砂岩、含砾凝灰质砂岩等; 6—泥盆系, 主要岩性包括砂岩、砾岩和粉砂岩; 7—花岗岩; 8—超基性岩; 9—石英脉及酸性脉岩; 10—断裂; 11—金矿床(点)

Fig. 1 Tectonic sketch map of west Junggar (a) and geological map of Sartohay region(b)

(modified after Zhu et al., 2013)

1—Quaternary; 2—Mesozoic sandstone, conglomerate, and mudstone; 3—Lower Carboniferous Tailagula Formation: intermediate-basic volcano lava, chert, and tuff; 4—Lower Carboniferous Baogutu Formation: mainly tuffaceous siltstone and sandstone; 5—Lower Carboniferous Xibeikulasai Formation: tuffaceous sandstone, and conglomeratic tuffaceous sandstone; 6—Devonian: sandstone, conglomerate, and siltstone; 7—Granite; 8—Ultramafic unit; 9—Quartz vein, intermediate and acidic dyke; 10—Fault; 11—Gold deposit

人认为成矿物质来源于蛇绿岩中的超镁铁质岩石,如周美付(1987)提出萨Ⅰ金矿是一种与碳酸盐化超镁铁岩有关的金矿床,曹烈等(1998)认为它是蛇绿岩型金矿,吴延之(2012)说它是剪切带超基性岩型金矿。这些学者将金矿体的围岩简单地归为蛇绿碳酸岩。矿区内出露的石英菱镁岩以及石英菱镁岩中发育的剪切变形并没有引起大家的重视。笔者最近对西准噶尔地区的地质格局有了新的认识(Zhu et al., 2013),并在萨尔托海地区厘定了一条韧性剪切带,发现石英菱镁岩沿着该剪切带分布,发生强度不等的剪切变形,萨Ⅰ金矿的成矿作用受剪切带的控制,金沉淀发生在石英菱镁岩韧性剪切变形向脆性变形转换阶段(邱添等,2012)。本文在进一步研究萨尔托海石英菱镁岩和萨Ⅰ金矿床地质特征的基础上,结合微量元素地球化学,探讨了萨Ⅰ金矿床的成矿作用。

1 矿区地质

新疆西准噶尔萨尔托海地区出露达拉布特蛇绿混杂岩(图1)。达拉布特蛇绿混杂岩主体为蛇纹石化的超镁铁质岩,大量辉长岩、硅质岩、玄武岩岩块嵌布其中。萨Ⅰ金矿床位于达拉布特蛇绿混杂岩带的东北端,产在超基性岩与蚀变玄武岩接触带附近,矿体主要赋存在石英菱镁岩中。萨尔托海断裂于NE向延伸13.5 km,左旋扭性,西南经石棉矿延至达拉布特断裂并与之相交(图1)。在此断裂两侧的火山区层和上、下岩层分界处常发育近EW向和NE向2组次级断裂,控制着萨Ⅰ金矿区的石英菱镁岩和含金矿脉的产出。晚期断裂主要为NW向和NNE向2组,对早期断裂有一定的破坏。这些断裂表现出多期次活动的特点,并叠加在遭受不同程度动力变质的糜棱岩化石英菱镁岩上。

萨Ⅰ金矿区附近,蛇绿混杂岩以萨尔托海断裂为北部边界,宽约1 km,走向NE(图2a、b)。实测NS向地质剖面(图2c)显示,混杂岩带北侧为一套泥岩夹硅质岩、粉砂岩互层的复理石建造,与下部的蚀变玄武岩以断层接触。断裂带中见少量滑石片岩和含透闪石大理岩。玄武岩遭受强烈劈理化,劈理方向近EW向。褐红色硅质岩呈不规则块体分布在蚀变玄武岩中。玄武岩之下为蛇纹岩,蛇纹岩中嵌布多个不规则的辉长岩块体(块体规模一般不超过5 m×10 m)。剖面南端的一套厚层火山角砾岩不整合

覆盖在蛇纹岩之上,火山角砾岩的角砾成分主要为玄武岩、辉长岩和硅质岩。在火山角砾岩之上为一套以粗砂岩为主的沉积系列,局部夹含砾砂岩。蚀变玄武岩、蛇纹岩以及两者的接触带上出露多个石英菱镁岩透镜体(构造接触)。透镜体大小不等,呈雁行式排列,最大的透镜体宽约100 m,而最小的不超过1 m。长轴方向与断裂走向基本一致。大的石英菱镁岩透镜体往往由多个石英菱镁岩小透镜体组成,有的透镜体直接出露地表,有的通过探槽被揭露出来(图2c)。

2 矿床地质特征

萨Ⅰ金矿床的围岩主要为石英菱镁岩,还有少量蛇纹岩和碳酸盐-滑石片岩。蛇纹岩主要由蛇纹石(>90%)和少量绿泥石、磁铁矿、铬尖晶石和白云石组成,具网脉状构造(图3a)。蛇纹石呈纤维状,局部蚀变为绿泥石、碳酸盐矿物。浸染状分布的铬尖晶石部分为粒状,部分为树枝状,从边缘、裂隙蚀变为铬铁矿或磁铁矿(图3b)。细粒他形的磁铁矿在岩石中呈斑杂状、不连续网脉状分布。碳酸盐-滑石片岩具有似斑状变晶结构,变斑晶主要为菱镁矿和白云石,基质由细小鳞片状滑石集合体组成,岩石中含少量残余铬尖晶石、蛇纹石、绿泥石和硫化物(图3c、d)。石英菱镁岩主要由菱镁矿(40%~60%)、石英(30%~50%)、白云石(5%~10%)、少量铬云母、铬尖晶石、滑石和硫化物组成,呈粒状变晶结构(图3e)。石英菱镁岩、碳酸盐-滑石片岩中的铬尖晶石与蛇纹岩或橄榄岩中的铬尖晶石具有相同的光学特征和化学成分,说明石英菱镁岩和碳酸盐-滑石片岩的原岩是蛇纹岩。

蛇纹岩热液交代蚀变的过程中,伴随强度不等的构造变形,导致碳酸盐-滑石片岩和石英菱镁岩表现出复杂的剪切变形。碳酸盐-滑石片岩的变形程度较弱,部分样品富含滑石和铁白云石,呈现出条带状构造(图3d)。石英菱镁岩可分为未变形的石英菱镁岩和糜棱岩化石英菱镁岩。糜棱岩化作用主要沿着石英菱镁岩透镜体的边缘发生,透镜体内部变形程度逐渐减弱或未变形。与未变形的石英菱镁岩相比,糜棱岩化石英菱镁岩中的矿物粒度较小,矿物定向趋势明显。矿物的含量和种类也发生了变化,菱镁矿、铬尖晶石的含量减少,石英、铬云母、金红石和磷灰石的含量增多(图3e、f)。

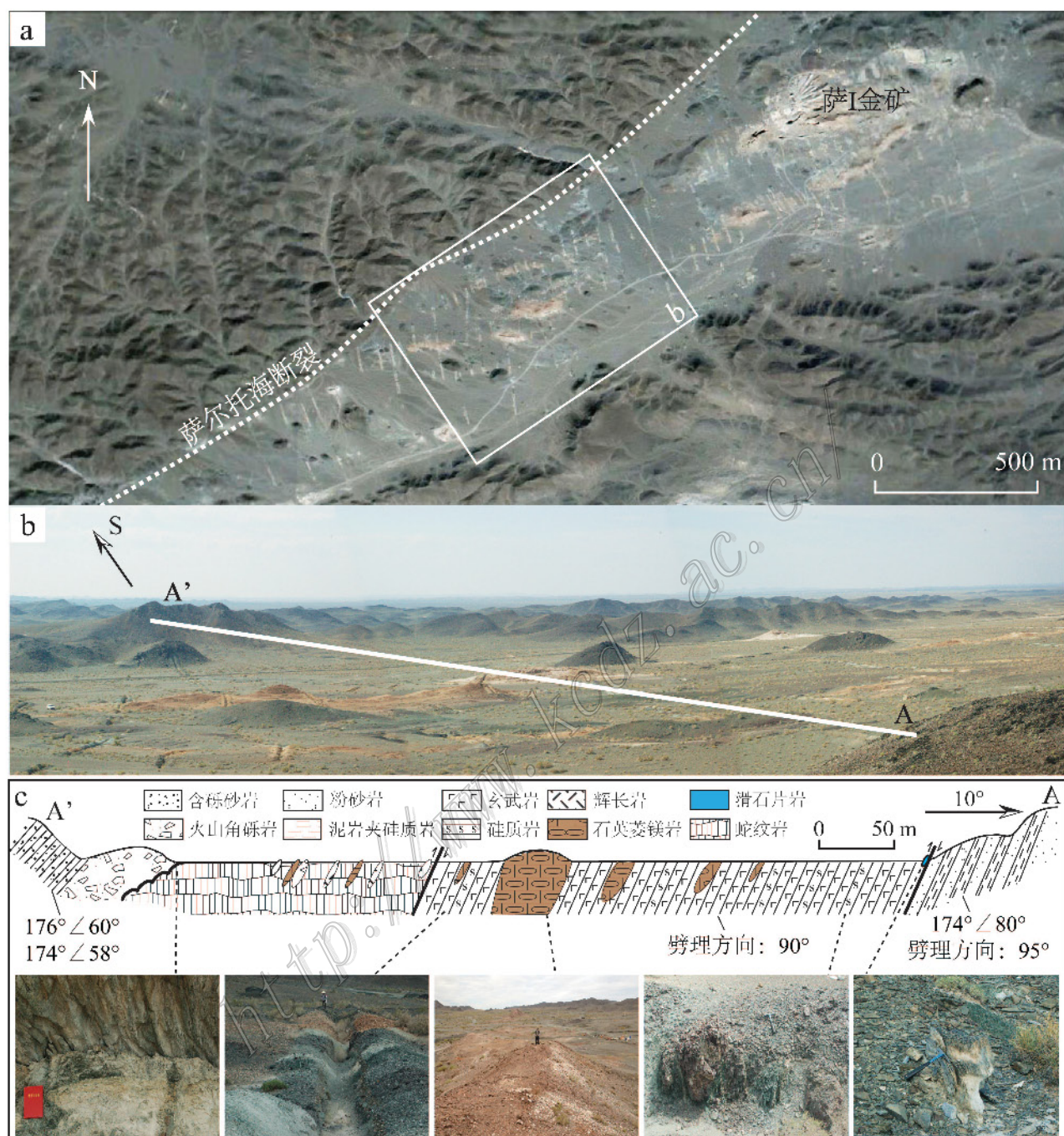


图 2 萨尔托海地区蛇绿混杂岩的展布特征及实测地质剖面

a. 萨尔托海地区蛇绿混杂岩带的遥感图; b. 蛇绿混杂岩带的野外展布特点; c. 蛇绿混杂岩带实测剖面

Fig. 2 Ophiolitic mélangé in Sartohay region

a. Geographic map based on GoogleEarth, showing the ophiolitic mélangé in Sartohay region; b. Distribution of ophiolitic mélangé; c. Geological section and outcrop of ophiolitic mélangé

在蛇纹岩转变为石英菱镁岩的过程中,岩石发生碳酸盐化和硅化,并叠加多期热液脉,导致岩石中富集黄铁矿、辉砷镍矿、黄铜矿和自然金等矿石矿

物,形成含金蚀变体。矿体类型包括含金糜棱岩化石英菱镁岩和含金石英脉 2 类,后者为主要的富矿体。相对于石英菱镁岩透镜体未变形或弱变形的

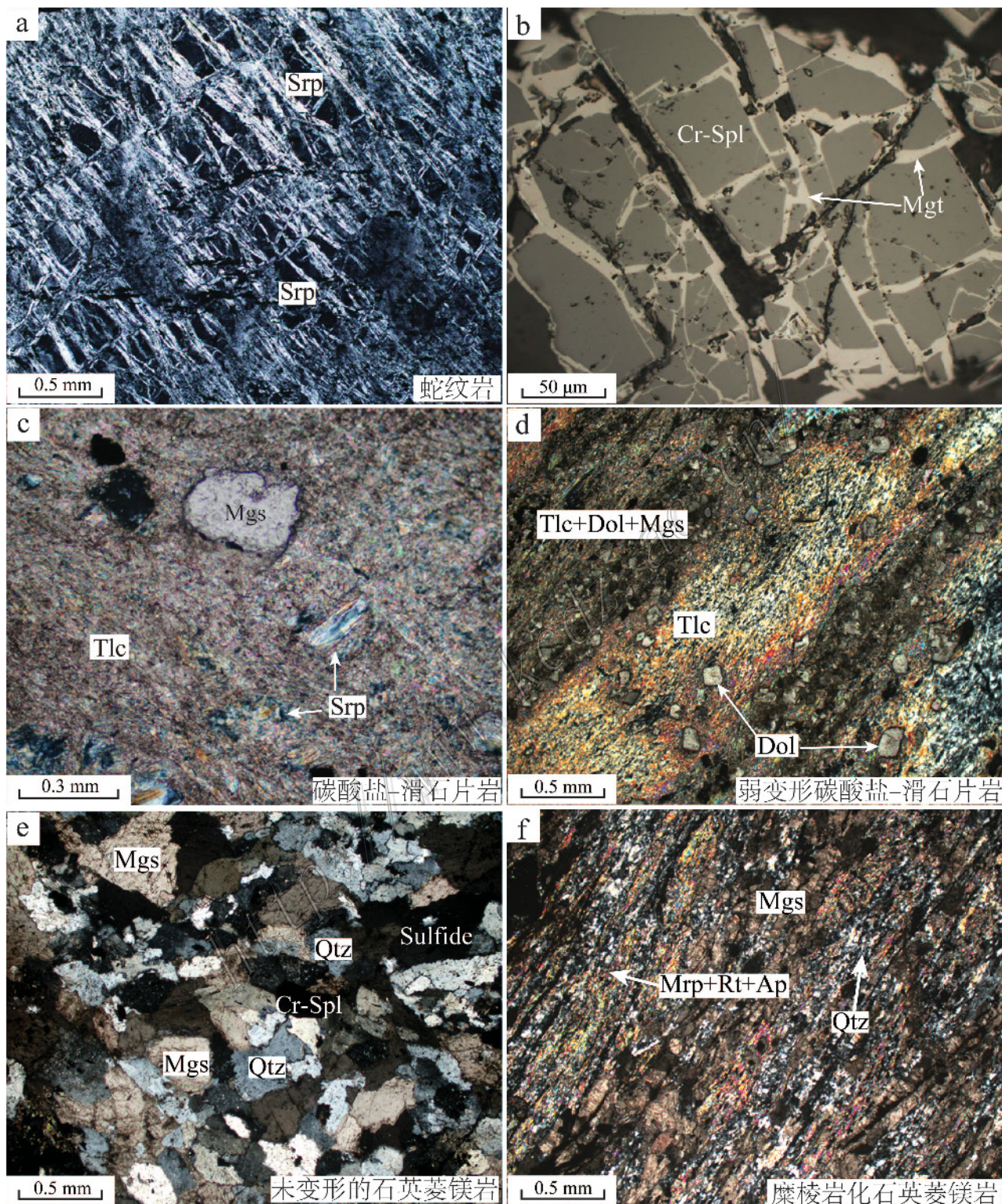


图3 萨 I 金矿矿体围岩的显微照片

a. 网脉状蛇纹岩; b. 铬尖晶石从边缘及裂隙蚀变为磁铁矿; c. 碳酸盐-滑石片岩的显微照片, 显示蛇纹石的残余; d. 弱变形的碳酸盐-滑石片岩, 显示富集滑石和富集碳酸盐的条带状构造; e. 未变形的石英菱镁岩, 石英和菱镁矿镶嵌共生; f. 糜棱岩化石英菱镁岩, 矿物定向趋势明显。b 为反射光, 其余为正交偏光

Srp—蛇纹石; Dol—白云石; Mgt—磁铁矿; Cr-Spl—铬尖晶石; Tlc—滑石; Qtz—石英; Mgs—菱镁矿; Mrp—铬云母; Rt—金红石;

Ap—磷灰石; Sulfide—硫化物

Fig. 3 Microphotographs of wall-rocks in the No. I Sartohay gold deposit

- a. Serpentine with stockwork texture; b. Cr-Spinels with fractured and altered rim; c. Carbonate-talc schist with residual serpentine; d. Deformed carbonate-talc schist showing banded structure; e. Undeformed listvenite showing mosaic symbiosis; f. Mylonitized listvenite
- Srp—Serpentine; Dol—Dolomite; Mgt—Magnetite; Cr-Spl—Cr-Spinel; Tlc—Talc; Qtz—Quartz; Mgs—Magnesite; Mrp—Mariposite; Rt—Rutile; Ap—Apatite

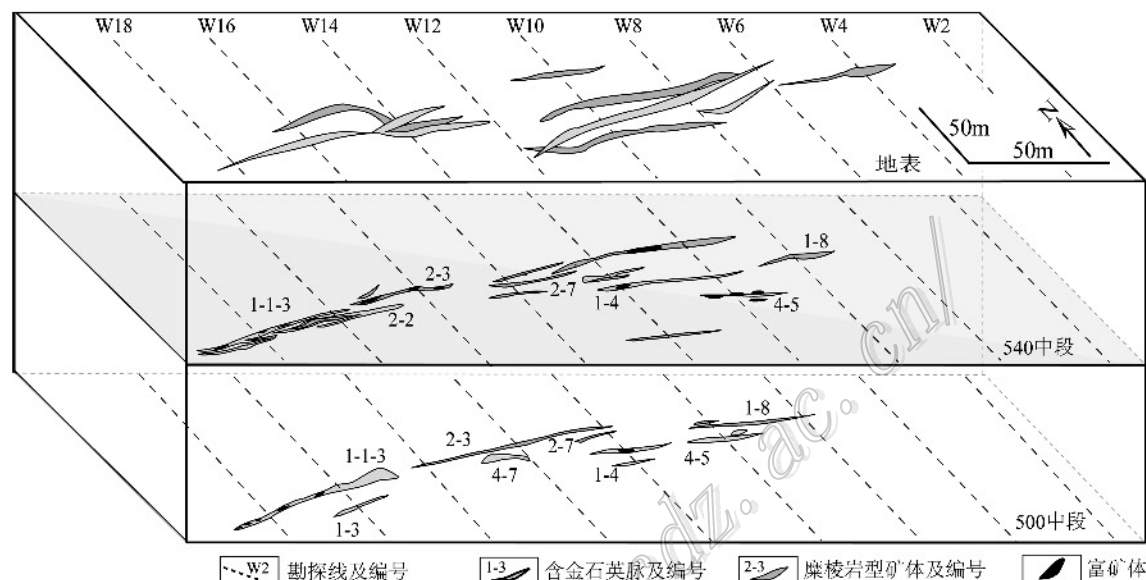


图4 萨I金矿矿体空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of orebodies in the No. I Sartohay gold deposit

核部,发生糜棱岩化的透镜体边部常出现金矿化,形成含金糜棱岩化石英菱镁岩。由于石英菱镁岩透镜体由多个更小的石英菱镁岩透镜体组成,这些小透镜体边缘的含金糜棱岩化石英菱镁岩构成矿体。矿体延伸方向和剪切面理方向一致。含金石英脉沿着糜棱岩化石英菱镁岩中的薄弱面或石英菱镁岩透镜体与玄武岩的接触边界分布,往往叠加在含金糜棱岩化石英菱镁岩上。总体上,两类矿体均走向NE,呈脉状,透镜状,具分支、膨缩现象(图4)。

含金糜棱岩化石英菱镁岩型矿体是矿山目前的主要开采对象(浅部的石英脉型矿体已经开采完毕,本文所研究的样品来自目前开采的坑道),矿体与围岩界线不清楚,通过品位分析圈出矿体。这种矿石呈白绿相间的颜色,白色域主要由菱镁矿组成,绿色域中富含铬云母(图5a)。矿石呈细脉浸染状,脉宽0.1~0.5 mm,细脉断续尖灭,且弯曲不平直。脉体延伸方向基本一致,与岩石糜棱面理近于平行或小角度穿切糜棱面理。热液脉中主要矿石矿物为黄铁矿、辉砷镍矿、黄铜矿和自然金;脉石矿物包括石英、

碳酸盐矿物和铬云母等,形成黄铁矿-石英-碳酸盐脉、自然金-辉砷镍矿-铬云母脉。自然金-辉砷镍矿-铬云母脉穿切或叠加黄铁矿-石英-碳酸盐脉(图5b、c)。铬云母($w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 为2.2%~4.1%)呈细粒鳞片状集合体与金红石共生。黄铁矿-石英-碳酸盐脉中的石英普遍具有波状消光现象,其中的碳酸盐矿物主要为菱镁矿和少量铁白云石。黄铁矿与细粒碳酸盐集合体共生,边部往往出现结晶石英压力影(图5c、d)。

含金石英脉型矿体主要是指自然金-硫化物-石英脉,厚度一般>0.3 m,长度往往>200 m,延深>300 m(图4),将这类脉体样品称为含金石英脉型矿石,将一些细小的矿脉(<0.5 mm,图5e)称为自然金-硫化物-石英脉。含金石英脉型矿体矿化连续性不好,常尖灭再现,其中可见明金。金品位较高,但极不均匀,黄铁矿的数量多少与金品位呈正相关关系(新疆有色金属地质勘探公司,1986)。含金石英脉中常出现糜棱岩化石英菱镁岩角砾,局部见热液石英胶结糜棱岩化石英菱镁岩角砾的热液角砾

含金糜棱岩化石英菱镁岩型矿体中,自然金主要形成于自然金-辉砷镍矿-铬云母脉中,与铬云母伴生或与黄铜矿、黄铁矿共生,被辉砷镍矿包裹(图 6a~c)。石英脉型矿体中自然金主要有 2 种产出形

式:① 被石英包裹或分布在石英粒间(图 6d);② 与黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、石英共生,形成自然金-硫化物-石英脉(图 6e)。在晚期黄铁矿裂隙中常见自然金、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和石英(图 6f)。

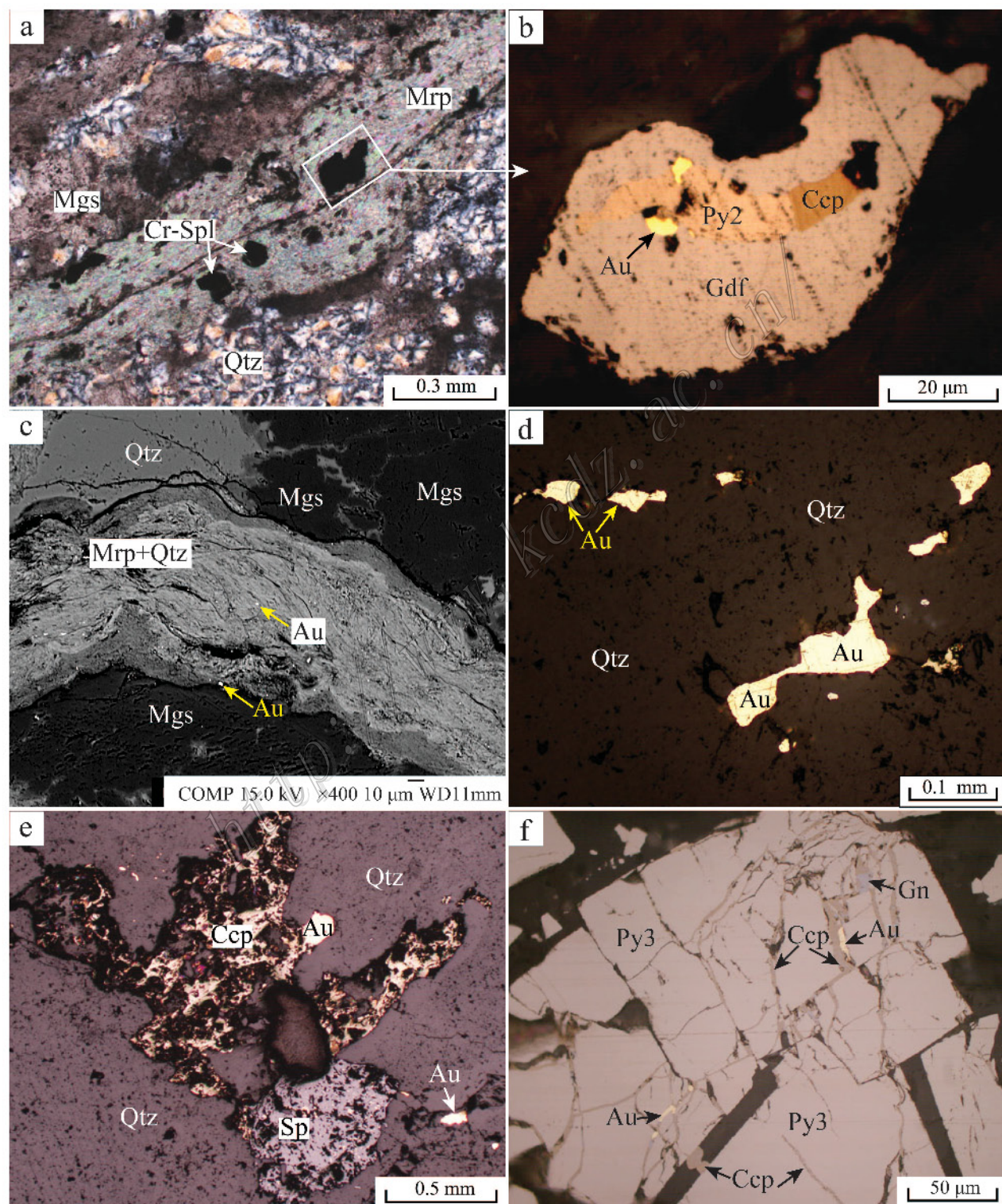


图 6 萨 I 金矿中自然金的存在形式

a-b. 自然金-辉砷镍矿-铬云母脉中,辉砷镍矿包裹自然金、黄铁矿和黄铜矿;c. 铬云母脉中与铬云母伴生的自然金;d. 自然金-硫化物-石英脉中,石英包裹自然金;e. 自然金-硫化物-石英脉中,自然金与黄铜矿、闪锌矿、石英共生;f. 黄铁矿裂隙中充填自然金、方铅矿、黄铜矿和石英,a 为正交偏光,b、d、e、f 为反射光,c 为背散射电子图像
Py—黄铁矿;Cep—黄铜矿;Gn—方铅矿;Sp—闪锌矿;Au—自然金;Qtz—石英;Cr-Spl—铬尖晶石;Gdf—辉砷镍矿;
Mgs—菱镁矿;Mrp—铬云母

Fig. 6 The distribution of gold in the No. I Sartohay gold deposit

a, b. Gold, pyrite and chalcopyrite enclosed by gersdorffite in gold-gersdorffite-mariposite vein;c. Native gold coexistent with mariposite in mariposite vein;d. Gold enclosed by quartz in gold-sulfide-quartz vein;e. Gold coexistent with chalcopyrite, sphalerite and quartz in gold-sulfide-quartz vein;f. Gold, galena, chalcopyrite and quartz filling the fracture in pyrite. Py—Pyrite;Cep—Chalcopyrite;Gn—Galena;Sp—Sphalerite;Au—Native gold;Qtz—Quartz;Cr-Spl—Cr-Spinel;Gdf—Gersdorffite;Mgs—Magnesite;Mrp—Mariposite

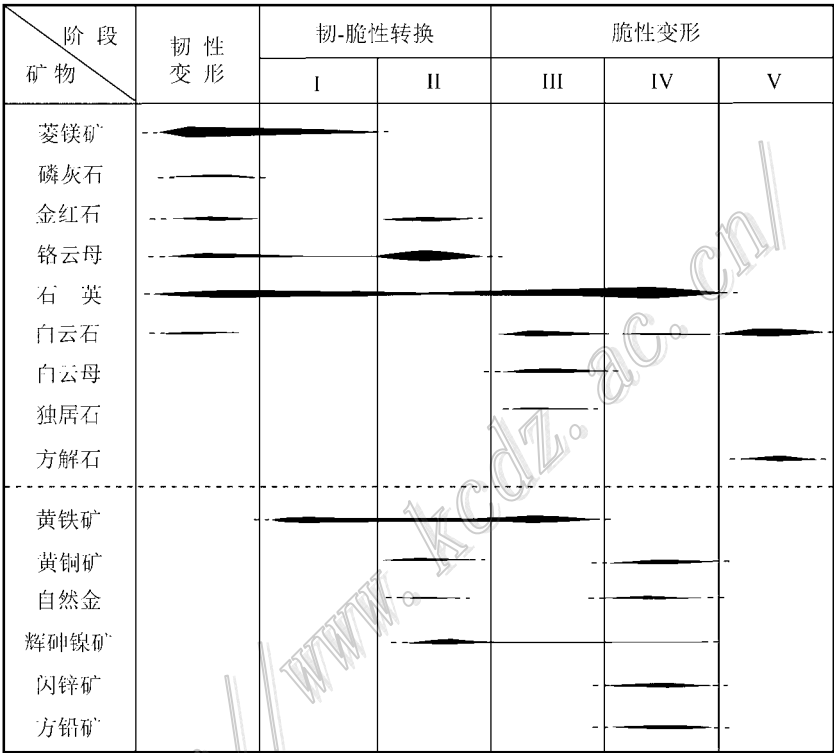


图 7 萨 I 金矿成矿阶段及矿物生成顺序

Fig. 7 The paragenetic sequence of minerals in the No. I Sartohay gold deposit

3 成矿阶段

根据矿体中矿物共生组合及脉体穿切关系,萨 I 金矿的热液演化作用可以划分为 5 个阶段(图 7):
阶段 I (黄铁矿-石英-碳酸盐阶段): 石英菱镁岩中近于平行或小角度穿切糜棱面理的方向形成微裂隙,成矿流体充填微裂隙形成黄铁矿-石英-碳酸盐脉(主要为菱镁矿,图 5b、c)。黄铁矿两侧往往出现压力影,其中的石英具波状消光(图 5d)。
阶段 II (自然金-辉砷镍矿-铬云母阶段): 矿石矿物主要为辉砷镍矿、黄铜矿、黄铁矿、自然金,脉石矿物主要为铬云母,含少量石英和金红石,形成的自

然金-辉砷镍矿-铬云母脉叠加或小角度穿切早期黄铁矿-石英-碳酸盐脉(图 5b、c)。
阶段 III (黄铁矿-碳酸盐-石英阶段): 形成黄铁矿-碳酸盐-石英脉,大角度穿切早期黄铁矿-石英-碳酸盐脉和自然金-辉砷镍矿-铬云母脉(图 5h)。自形黄铁矿常包裹显微独居石(粒度为 1~20 μm)(图 5i) 碳酸盐矿物主要为白云石。
阶段 IV (自然金-硫化物-石英阶段): 主要形成石英、少量碳酸盐矿物、白云母、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉砷镍矿和自然金,乳白色自然金-硫化物-石英脉大角度穿切糜棱面理(图 5a、e)。在早期黄铁矿的裂隙中也充填了该阶段的矿物组合(图 6f)。
阶段 V (碳酸盐阶段): 碳酸盐脉和石英-碳酸盐

脉切穿早期所有矿脉(图 5 j)。

这些热液活动依次叠加在糜棱岩化石英菱镁岩上,阶段Ⅰ和Ⅱ发生在石英菱镁岩经历韧脆性变形转换过程中,阶段Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ形成于脆性变形过程中。韧脆性变形转换期间,在近于平行或小角度穿切糜棱面理的方向形成微裂隙,成矿流体充填微裂隙形成黄铁矿-石英-碳酸盐脉(阶段Ⅰ)、自然金-辉砷镍矿-铬云母脉(阶段Ⅱ)。脆性变形过程中,形成大角度切割糜棱面理的黄铁矿-碳酸盐-石英脉(阶段Ⅲ),自然金-硫化物-石英脉(阶段Ⅳ)以及碳酸盐脉(阶段Ⅴ)。阶段Ⅱ和Ⅳ分别为 Au-As(自然金-辉砷镍矿,图 6b)、Au-Cu 矿化(自然金-黄铜矿-闪锌矿-方铅矿,图 6d、f)。阶段Ⅳ矿化形成了萨Ⅰ金矿的主要矿体。

4 主要矿石矿物化学

萨Ⅰ金矿床的主要矿石矿物包括黄铁矿、辉砷镍矿、黄铜矿、闪锌矿和自然金。矿石矿物的化学成分见表 1。主要硫化物的化学成分变化如图 8a~c 所示。自然金-辉砷镍矿-铬云母脉中,黄铜矿的 $w(As)$ 为 0.16%~0.21%, $w(Ni)$ 为 1.15%~1.18%,明显比自然金-硫化物-石英脉中黄铜矿的 $w(As)$ (0~0.04%)、 $w(Ni)$ (0~0.05%) 含量高。自然金-硫化物-石英脉中与黄铜矿共生的闪锌矿含少量 Fe(0.77%~3.07%)和 Cu(达 2.28%)。自然金-辉砷镍矿-铬云母脉中,辉砷镍矿的 $w(Ni)$ 平均 33.17%, $w(Fe)$ 平均 1.52%, $w(Co)$ 平均 1.65%,

表 1 萨Ⅰ金矿床主要矿石矿物的电子探针分析结果($w_B/\%$)
Table 1 Representative compositions of sulfides in the No. 1 Sartohay gold deposit ($w_B/\%$)

矿物	阶段	Fe	As	S	Ni	Cu	Ag	Zn	Co	Au	Sb	总和
黄铁矿	Ⅰ	45.81	0.52	52.25	0.76	0	0.03	0	0	0.04	0	99.41
黄铁矿	Ⅰ	46.64	0.11	52.35	0.27	0.09	0	0.02	0	0.08	0.01	99.57
黄铁矿	Ⅰ	46.72	0.39	52.74	0.37	0	0	0.00	0	0.15	0	100.37
黄铁矿	Ⅰ	46.27	0.99	51.91	0.05	0.01	0.01	0.01	0	0	0	99.25
黄铁矿	Ⅰ	47.06	0.25	52.35	0.12	0	0.03	0.01	0	0	0	99.82
黄铁矿	Ⅰ	46.70	0.63	52.44	0.08	0.00	0	0	0	0	0	99.85
黄铁矿	Ⅰ	47.27	0.41	52.41	0.02	0	0	0.03	0	0	0	100.14
黄铁矿	Ⅰ	46.49	0.28	52.17	0.06	0	0.01	0	0	0	0	99.01
黄铁矿	Ⅰ	46.94	0.28	52.24	0.05	0	0	0.01	0	0	0	99.52
黄铁矿	Ⅰ	46.95	0.44	53.06	0	0	0.02	0	0	0.09	0	100.56
黄铁矿	Ⅰ	46.94	0.79	52.10	0.11	0	0	0.02	0	0	0	99.96
黄铁矿	Ⅰ	47.56	0.55	52.43	0.03	0	0	0	0	0.06	0	100.63
黄铁矿	Ⅰ	46.83	0.31	53.03	0.03	0	0	0	0	0	0.02	100.22
黄铁矿	Ⅰ	46.90	0.10	53.35	0.04	0.03	0	0	0	0.18	0	100.60
黄铁矿	Ⅰ	46.70	0.19	53.37	0.06	0.04	0.01	0.01	0	0	0	100.38
黄铁矿	Ⅰ	46.54	0.40	51.91	0.02	0	0	0	0	0	0.03	98.90
黄铁矿	Ⅰ	46.09	0.58	51.40	0.69	0	0	0.02	0	0.03	0	98.81
黄铁矿	Ⅰ	45.97	0.40	52.29	0.60	0	0	0.05	0	0.08	0	99.39
黄铁矿	Ⅰ	46.74	0.23	52.35	0.30	0.01	0	0	0	0	0	99.63
黄铁矿	Ⅰ	46.70	0.26	52.31	0.02	0	0	0.03	0	0	0	99.32
黄铁矿	Ⅰ	46.30	0.53	51.45	0.08	0	0	0.04	0	0.01	0	98.41
黄铁矿	Ⅰ	47.33	0.48	51.73	0.05	0.02	0	0.06	0	0.16	0	99.83
黄铁矿	Ⅰ	47.12	0.34	52.23	0.05	0.02	0	0.05	0	0.04	0	99.85
黄铁矿	Ⅰ	46.64	0.55	53.21	0.02	0.02	0	0	0	0.11	0	100.55
黄铁矿	Ⅱ	46.03	4.46	49.11	0.03	0.01	0.01	0	0	0.06	0	99.71
黄铁矿	Ⅱ	46.16	4.38	49.81	0.04	0.03	0	0.01	0	0	0	100.43
黄铁矿	Ⅱ	45.67	3.81	49.58	0.01	0.06	0.03	0.02	0	0	0	99.18
黄铁矿	Ⅱ	46.48	4.29	49.61	0.03	0.01	0	0	0	0.16	0	100.58
黄铁矿	Ⅱ	46.40	1.33	51.19	0.02	0.03	0	0	0	0.11	0	99.08
黄铁矿	Ⅱ	46.83	1.61	51.22	0.07	0	0	0.04	0	0	0	99.77
黄铁矿	Ⅱ	46.47	1.02	50.99	0.05	0	0	0	0	0.14	0	98.67
黄铁矿	Ⅱ	45.06	1.24	51.31	0.59	0	0.02	0	0	0	0.01	98.23
黄铁矿	Ⅲ	46.04	0.14	53.47	0.05	0.01	0	0.05	0	0.06	0	99.82

续表 1
Cont. Table 1

矿物	阶段	Fe	As	S	Ni	Cu	Ag	Zn	Co	Au	Sb	总和
黄铁矿	Ⅲ	45.62	0.07	53.36	0	0.07	0	0.02	0	0.05	0	99.19
黄铁矿	Ⅲ	45.89	0.30	53.21	0.06	0.02	0.04	0.08	0	0	0	99.60
黄铁矿	Ⅲ	46.19	0.02	53.62	0	0	0	0.08	0	0	0	99.91
黄铁矿	Ⅲ	46.02	0.17	53.60	0.10	0	0.02	0	0	0.10	0	100.01
黄铁矿	Ⅲ	46.10	0.03	53.52	0.03	0.04	0	0	0	0	0	99.72
黄铁矿	Ⅲ	45.90	0.15	53.56	0.04	0.02	0	0.02	0	0	0.03	99.72
黄铁矿	Ⅲ	46.09	0	53.61	0	0	0.01	0.07	0	0	0	99.78
黄铁矿	Ⅲ	46.03	0	53.37	0.05	0	0	0.05	0	0.23	0.01	99.74
黄铁矿	Ⅲ	45.98	0.04	53.40	0	0	0	0.04	0	0.05	0	99.51
含银自然金	Ⅱ	0.70	0	0.16	2.57	0	12.81	0	0.02	83.02	0	99.28
含银自然金	Ⅳ	0.19	0	0.25	0	0	14.99	0	0	84.87	0	100.30
含银自然金	Ⅳ	0.49	0	0.86	0.01	0.10	15.20	0	0	82.58	0	99.24
含银自然金	Ⅳ	0	0	0.06	0.07	0.01	9.92	0	0	89.57	0	99.63
含银自然金	Ⅳ	0.01	0	0.03	0.01	0	10.23	0	0	91.18	0	101.46
含银自然金	Ⅳ	0.12	0	0.13	0.05	0.24	9.57	0	0	90.62	0	100.73
含银自然金	Ⅳ	0	0.01	0.02	0	0	9.67	0	0.01	91.28	0	100.99
含银自然金	Ⅳ	0	0.07	0.05	0.01	0	9.86	0	0.04	90.16	0	100.19
黄铜矿	Ⅱ	29.75	0.16	34.74	1.15	33.03	0.01	0	0	0.30	0	99.14
黄铜矿	Ⅱ	29.24	0.21	35.06	1.18	33.06	0.01	0	0	0.08	0	98.84
黄铜矿	Ⅳ	30.55	0	35.03	0.03	33.99	0.03	0	0	0	0	99.63
黄铜矿	Ⅳ	30.31	0.04	34.81	0.03	33.02	0	0	0	0	0.02	98.23
黄铜矿	Ⅳ	30.07	0	34.80	0.04	33.70	0	0	0	0.25	0	98.86
黄铜矿	Ⅳ	28.28	0.03	34.37	0.05	32.68	0.01	2.74	0	0.18	0.03	98.37
黄铜矿	Ⅳ	30.25	0.04	34.62	0.01	33.64	0	0	0	0	0	98.56
黄铜矿	Ⅳ	30.35	0.04	34.79	0.02	33.65	0.01	0	0	0	0	98.86
黄铜矿	Ⅳ	30.75	0.04	34.17	0.05	34.24	0	0.03	0	0	0	99.28
黄铜矿	Ⅳ	29.64	0	34.51	0	33.78	0.06	0	0	0	0	97.99
黄铜矿	Ⅳ	30.82	0	34.06	0	33.28	0	0.06	0	0.25	0	98.47
黄铜矿	Ⅳ	31.83	0.02	34.21	0	33.23	0.04	0.02	0	0.03	0	99.38
黄铜矿	Ⅳ	30.91	0	34.26	0.05	33.21	0.03	0.01	0	0.24	0	98.71
黄铜矿	Ⅳ	31.81	0	33.53	0	33.63	0.01	0	0	0.29	0	99.27
黄铜矿	Ⅳ	29.86	0	35.25	0.01	36.48	0.04	0	0	0.03	0.03	101.70
黄铜矿	Ⅳ	30.43	0.03	34.41	0	34.30	0.01	0.03	0	0	0	99.21
闪锌矿	Ⅳ	2.34	0	32.33	0	1.10	0	64.64	0	0.05	0	100.46
闪锌矿	Ⅳ	0.98	0.13	33.51	0.02	0.18	0	66.12	0.02	0.01	0	100.97
闪锌矿	Ⅳ	3.07	0	32.79	0	2.28	0	62.51	0	0.09	0	100.74
闪锌矿	Ⅳ	0.77	0.06	32.80	0	0.17	0	65.95	0	0.14	0	99.89
闪锌矿	Ⅳ	1.25	0.03	32.55	0.03	0.13	0	65.72	0.02	0.07	0.01	99.81
闪锌矿	Ⅳ	1.37	0.08	32.68	0	0.18	0	65.30	0.02	0.12	0.01	99.76
辉砷镍矿	Ⅱ	3.15	43.70	19.97	31.54	0	0	0	0.26	0	0.28	98.90
辉砷镍矿	Ⅱ	0.79	42.32	19.78	34.33	0	0	0.01	1.76	0	0.54	99.53
辉砷镍矿	Ⅱ	0.61	42.99	20.47	35.29	0	0	0.01	0.81	0.17	0.40	100.75
辉砷镍矿	Ⅱ	0.83	42.82	19.37	34.27	0	0	0	1.42	0	0.29	99.00
辉砷镍矿	Ⅱ	2.21	43.21	19.87	30.43	0	0.01	0.01	3.98	0	0.11	99.83
辉砷镍矿	Ⅳ	0.74	42.96	19.20	34.35	0	0.04	0.03	0.58	0	0.45	98.35
辉砷镍矿	Ⅳ	1.73	42.50	19.45	34.05	0	0	0.03	1.03	0	0.20	98.99
辉砷镍矿	Ⅳ	1.46	42.45	19.19	32.90	0	0.01	0.09	1.79	0	0.05	97.94
辉砷镍矿	Ⅳ	1.07	42.80	19.64	32.84	0	0.04	0.04	2.17	0.09	0.61	99.30
辉砷镍矿	Ⅳ	1.77	43.45	19.44	33.73	0	0	0	1.04	0	0.60	100.03
辉砷镍矿	Ⅳ	2.27	42.91	19.86	32.45	0	0	0	1.20	0	0.32	99.01

注：北京大学地球与空间科学学院电子探针实验室分析(JEOL JXA-8100,电子束直径 1 μm,加速电压 20 kV,束流 1×10⁻⁸A)。阶段Ⅰ形成黄铁矿-石英-碳酸盐脉,阶段Ⅱ形成自然金-辉砷镍矿-铬云母脉,阶段Ⅲ形成黄铁矿-碳酸盐-石英脉,阶段Ⅳ形成自然金-硫化物-石英脉。

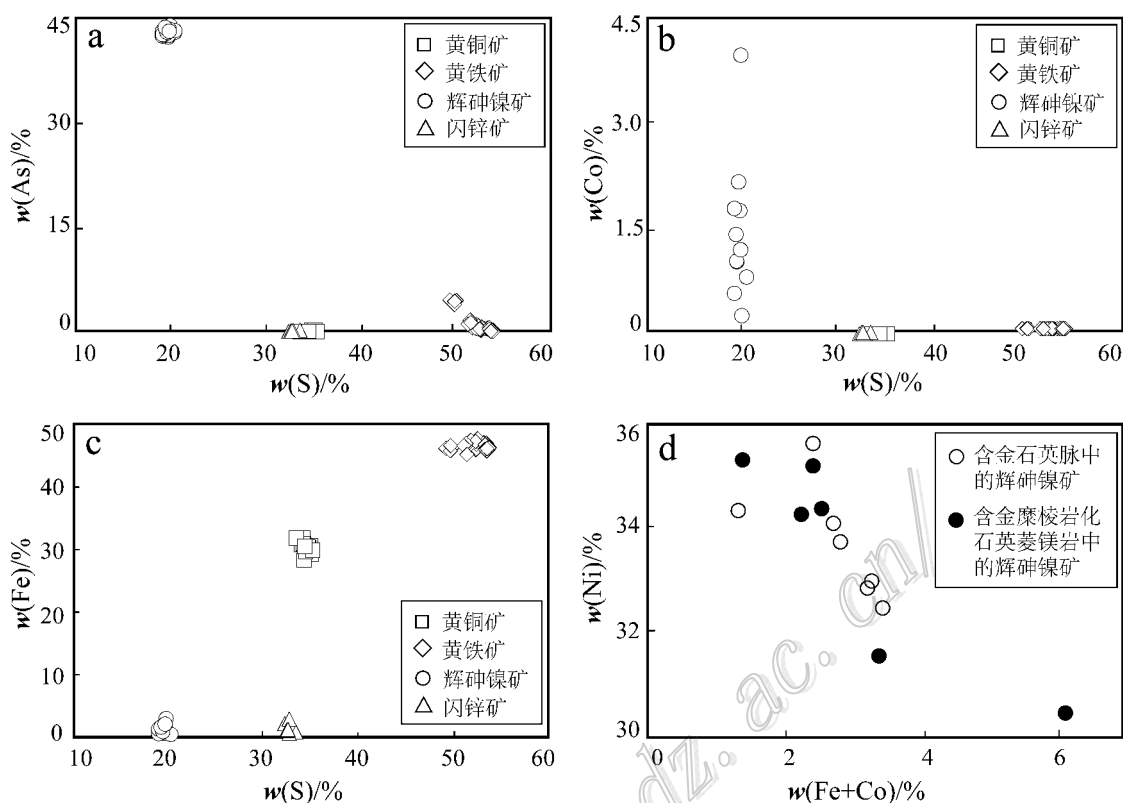


图 8 萨 I 金矿中主要硫化物的化学成分变异图(a~c) 辉砷镍矿中 Fe+Co 与 Ni 含量的相关图(d)

Fig. 8 Compositional space for the major sulfides in the No. I Sartohay gold deposit (a~c); Variation of Fe+Co and Ni content in gersdorffite from the No. I Sartohay gold deposit (d)

Fe 和 Co 不完全类质同象替代 Ni。自然金-硫化物-石英脉中辉砷镍矿的 $w(\text{Ni})$ 平均 33.39%，Fe、Co 含量与自然金-辉砷镍矿-铬云母脉中的辉砷镍矿相当(分别为 1.51% 和 1.30%)，在 (Fe+Co)-Ni 图中呈负相关关系(图 8d)。

含金糜棱岩化石英菱镁岩型矿石中自然金粒度多小于 $5\ \mu\text{m}$ (图 6b、c)，电子探针难以准确测定其化学成分，对粒度较大的自然金颗粒测定表明， $w(\text{Au}) = 83.02\%$ ， $w(\text{Ag}) = 12.81\%$ (含银自然金)。含银自然金也含少量 Ni (2.57%)。含金石英脉型矿石中自然金(含银自然金)粒度较大(图 6d~f)，电子探针分析表明， $w(\text{Au})$ 平均 88.61%， $w(\text{Ag})$ 平均 11.35% (表 1)。

在萨 I 金矿中识别出 3 期黄铁矿。早期黄铁矿(Py1)被富砷黄铁矿(Py2)交代，晚期的自形黄铁矿(Py3)交代 Py2(图 9a)。Py1 形成于黄铁矿-石英-碳酸盐阶段， $w(\text{S})$ 平均 52.38%， $w(\text{As})$ 平均 0.40%， $w(\text{Ni})$ 平均 0.16%，As 和 Ni 可能呈类质同象分别替代黄铁矿中的 S 和 Fe。Py2 形成于自然金-辉砷

镍矿-铬云母阶段，相对贫硫($w(\text{S})$ 平均为 50.35%)、富砷($w(\text{As})$ 平均 2.77%)，且常与黄铜矿和自然金共生(图 6b，图 9b)。Py3 形成于黄铁矿-碳酸盐-石英阶段，且交代 Py2。Py3 的 $w(\text{S})$ 平均 53.47%， $w(\text{As})$ 平均 0.09%。3 期黄铁矿的 S 和 As 具有显著的负相关关系(图 9c)，表明部分 S 与 As 发生类质同象替代。

4 地球化学

选取未变形的石英菱镁岩围岩、含金糜棱岩化石英菱镁岩和含金石英脉型矿石样品，并挑选出含金糜棱岩化石英菱镁岩中的黄铁矿-石英-碳酸盐脉(阶段 I)、黄铁矿-碳酸盐-石英脉(阶段 III)、自然金-硫化物-石英脉(阶段 IV)和碳酸盐脉(阶段 V)样品，分别进行微量元素分析。样品经过 2 次破碎和挑选后，用蒸馏水清洗，在不锈钢擂钵中破碎至 60 目，再用玛瑙研钵研磨至 200 目以下。样品前处理和微量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点

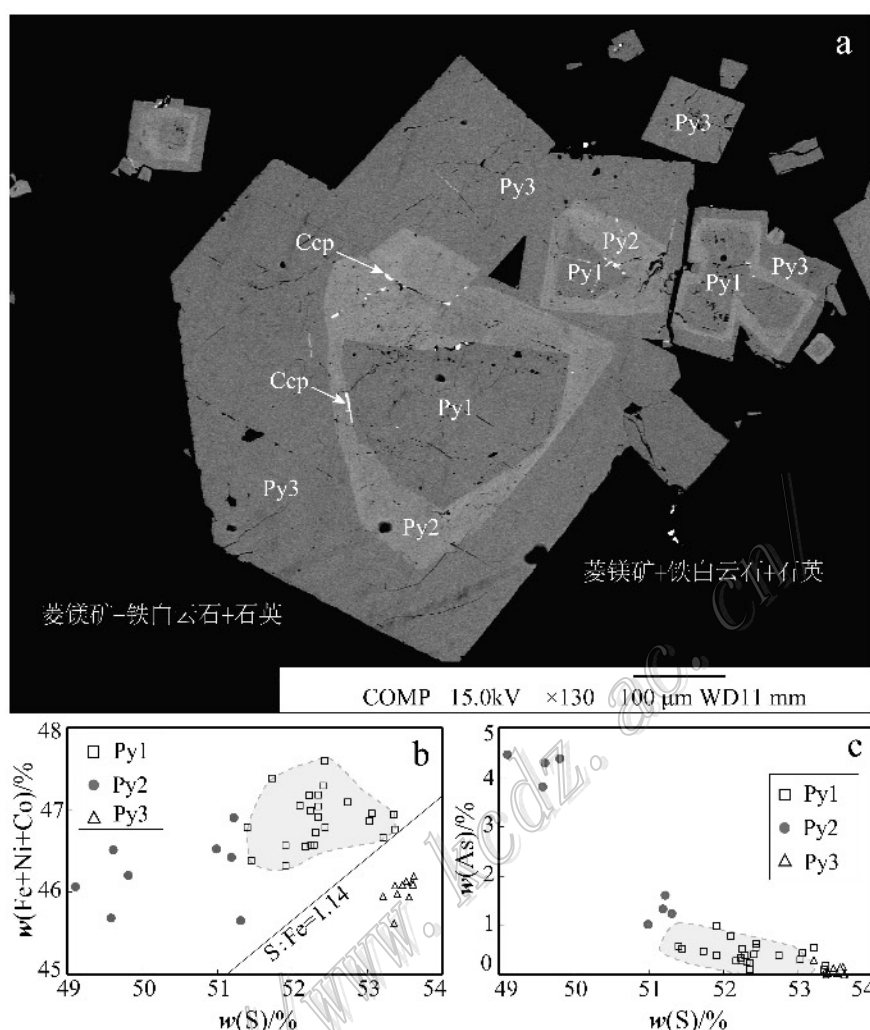


图9 萨 I 金矿中三期黄铁矿的 BSE 图及成分变化

Fig. 9 BSE image and composition of pyrite in the No. I Sartohay gold deposit

实验室完成,使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,结果见表2。

球粒陨石标准化的稀土元素配分模式图中(图10a),含金糜棱岩化石英菱镁岩具有轻重稀土元素分馏较弱的平坦型稀土元素配分模式, $(La/Yb)_N$ 为2.50和2.64,稀土元素总量为 11.52×10^{-6} 和 12.29×10^{-6} 。含金石英脉的轻重稀土元素分馏程度较含金糜棱岩化石英菱镁岩强 $((La/Yb)_N = 7.83)$,但稀土元素总量 (2.16×10^{-6}) 明显低于含金糜棱岩化石英菱镁岩。未变形石英菱镁岩具有平坦型的稀土元素配分模式,稀土元素总量 $(0.20 \times 10^{-6} \sim 0.76 \times 10^{-6})$ 低于含金糜棱岩化石英菱镁岩和含金石英脉。原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图10b)表明,含金糜棱岩化石英菱镁岩相对富集 Rb 和 Ba; 含金石英

脉的 Nb、Th、Zr、Hf 和 Ti 相对亏损, Sr 和 P 相对富集; 未变形石英菱镁岩强烈亏损 Nb、Zr、Hf 和 Ti。

含金糜棱岩化石英菱镁岩中黄铁矿-石英-碳酸盐脉、黄铁矿-碳酸盐-石英脉、自然金-硫化物-石英脉和碳酸盐脉的稀土元素配分模式和微量元素蛛网图见图10c、d。黄铁矿-石英-碳酸盐脉的稀土元素配分模式为右倾式,轻稀土元素弱富集 $((La/Yb)_N = 2.12)$ 。这种矿脉富集 Rb、Sr、Ba, 亏损 Th、U、Nb、Ti、Zr、Hf。黄铁矿-碳酸盐-石英脉的稀土元素配分模式也为弱的右倾式, $(La/Yb)_N = 1.90$ 。稀土元素总量 53.39×10^{-6} , 比黄铁矿-石英-碳酸盐脉的稀土元素总量 (3.95×10^{-6}) 高出1个数量级。具明显 Eu 和 Ce 的正异常 $(\delta Eu = 2.10, \delta Ce = 2.26)$ 。原始地幔标准化的多元素图解(图10d)显示,黄铁矿-

表 2 萨 I 金矿中各种矿石、围岩和热液脉的微量元素含量 ($w_B/\%$)

Table 2 Trace element content of different rocks in the No. I Sartohay gold deposit ($w_B/\%$)

组分	未变形石英菱镁岩			含金糜棱岩化石英菱镁岩		含金石英脉	HST*	HTS*	自然金-硫化物-石英脉			碳酸盐脉		
	SI-13	SI-8	J-154	J-156	J-156a	J-160	J-156-1	SI-11	J-161	J-162	J-163	J-164	J-165	J-166
Li	6.42	4.00	1.37	4.39	4.15	0.97	3.27	0.49	0.86	2.04	0.51	0.65	0.61	0.64
Be	0.10	0.12	0.16	0.43	0.40	0.04	0.38	0.03	0.02	0.03	0.05	0.08	0.04	0.11
P	4.57	10.29	10.50	53.54	43.22	150	7.43	13439	144	20.84	79.86	35.94	13.15	30.64
Sc	6.38	4.84	5.70	11.32	12.63	0.19	11.75	1.13	0.17	0.72	1.91	2.48	2.85	7.95
Ti	25.68	8.84	27.66	1759	1805	37.69	132	53.33	29.45	7.14	193	28.74	27.70	129
V	22.35	18.98	11.50	50.55	52.61	5.84	64.34	13.50	5.94	5.33	15.83	14.42	12.80	26.52
Cr	1819	923	2089	1446	1381	59.06	3499	39.44	45.32	116	171	696	425	40.55
Co	76.15	58.81	76.23	70.13	72.43	2.82	135	5.72	2.71	8.09	9.24	32.44	12.24	2.61
Ni	1559	813	1386	1449	1409	22.52	2470	35.05	20.88	127	126	661	223	31.33
Cu	6.18	3.59	3.07	24.18	22.66	21.35	40.32	13.17	22.36	13.84	24.91	4.06	9.26	5.51
Ga	0.70	0.71	0.48	3.11	3.23	0.52	3.24	0.62	0.47	0.46	1.10	0.64	0.39	1.10
Rb	0.35	0.05	0.83	11.33	12.40	0.89	11.08	0.35	0.65	0.25	1.93	2.24	0.83	3.31
Sr	0.51	93.72	14.40	51.89	64.51	34.15	54.45	222	17.86	14.21	54.12	347	415	540
Y	0.12	0.21	0.09	3.32	3.62	0.39	1.48	22.98	0.38	0.20	1.12	2.43	3.36	9.86
Zr	0.36	0.59	0.19	21.02	24.93	1.04	1.15	2.46	0.74	0.37	5.06	0.86	0.51	4.82
Nb	0.00	0.03	0.00	1.40	2.56	0.17	0.10	0.19	0.05	0.02	0.33	0.00	0.00	0.10
Ba	1.58	3.66	11.58	43.64	49.79	10.05	36.32	4.43	6.15	1.82	6.88	8.50	7.60	12.23
La	0.02	0.17	0.03	1.52	1.69	0.31	0.50	4.10	0.27	0.04	0.91	0.67	0.74	2.48
Ce	0.05	0.24	0.03	3.89	4.29	1.15	1.15	21.69	0.99	0.23	4.57	1.66	2.09	7.84
Pr	0.03	0.02	0.01	0.48	0.52	0.07	0.15	1.36	0.06	0.01	0.24	0.25	0.31	1.05
Nd	0.08	0.09	0.04	2.30	2.37	0.26	0.75	7.02	0.26	0.07	1.07	1.35	1.69	5.63
Sm	0.02	0.03	0.01	0.55	0.56	0.06	0.21	2.57	0.07	0.02	0.25	0.48	0.62	1.91
Eu	0.01	0.06	0.01	0.19	0.20	0.04	0.13	2.23	0.04	0.01	0.08	0.30	0.39	0.97
Gd	0.02	0.04	0.01	0.65	0.66	0.08	0.28	4.10	0.09	0.04	0.32	0.60	0.79	2.39
Tb	0.003	0.01	0.004	0.11	0.11	0.01	0.05	0.74	0.01	0.01	0.05	0.10	0.13	0.39
Dy	0.02	0.04	0.01	0.69	0.69	0.08	0.29	4.57	0.09	0.04	0.26	0.54	0.74	2.21
Ho	0.004	0.01	0.004	0.14	0.15	0.02	0.06	0.83	0.02	0.01	0.05	0.09	0.12	0.38
Er	0.01	0.02	0.01	0.43	0.43	0.04	0.17	2.17	0.04	0.02	0.13	0.22	0.30	0.91
Tm	0.003	0.00	0.001	0.06	0.07	0.01	0.03	0.27	0.01	0.004	0.02	0.03	0.04	0.12
Yb	0.02	0.03	0.02	0.44	0.46	0.03	0.17	1.54	0.03	0.02	0.12	0.15	0.19	0.69
Lu	0.004	0.00	0.001	0.07	0.08	0.005	0.03	0.19	0.00	0.004	0.02	0.02	0.03	0.09
Hf	0.01	0.02	0.002	0.64	0.67	0.03	0.04	0.09	0.02	0.01	0.14	0.03	0.02	0.15
Ta	0.65	0.64	0.000	0.50	0.19	0.01	0.69	0.66	0.71	0.68	0.64	0.66	0.63	0.60
Pb	4.46	3.43	9.04	12.73	6.08	21.40	19.45	29.51	45.85	8.91	11.03	7.96	33.45	14.71
Th	0.07	0.06	0.05	0.26	0.29	0.03	0.01	0.26	0.02	0.01	0.12	0.01	0.003	0.13
U	0.02	0.05	0.004	0.05	0.08	0.03	0.01	0.06	0.01	0.02	0.05	0.00	0.03	0.03
REE	0.30	0.76	0.20	11.52	12.29	2.16	3.95	53.39	1.98	0.52	8.07	6.45	8.18	27.05
(La/Yb) _N	0.72	4.38	1.12	2.50	2.64	7.83	2.12	1.90	6.43	1.14	5.61	3.19	2.73	2.57
δEu	1.02	5.27	2.32	0.95	0.99	1.61	1.68	2.10	1.51	1.18	0.90	1.72	1.70	1.40
δCe	0.50	1.14	0.41	1.11	1.12	1.94	1.04	2.26	1.99	3.00	2.42	1.01	1.08	1.20

注：比值单位为 1。HST* = 黄铁矿-石英-碳酸盐脉，HTS* = 黄铁矿-碳酸盐-石英脉，北京大学地球与空间科学院 ICP-MS 分析。

碳酸盐-石英脉富集 Th、La、Ce 和 Nd, 亏损 Rb、Ba、Nb、Zr、Hf 和 Ti。相对高的稀土元素总量, 且强烈富集 Th、La、Ce 和 Nd, 可能主要受该阶段独居石矿物相的影响。自然金-硫化物-石英脉的稀土元素配分模式为右倾式, 稀土元素总量很低 (平均 $3.52 \times$

10^{-6}), 轻稀土元素弱富集 ((La/Yb)_N 平均为 4.39) 且显示弱 Eu 正异常 (δEu 平均为 1.2)。自然金-硫化物-石英脉的稀土元素配分模式和微量元素蛛网图与粗大的含金石英脉型矿石基本一致 (图 10), 也说明两者是同一阶段热液演化的产物。自然金-硫

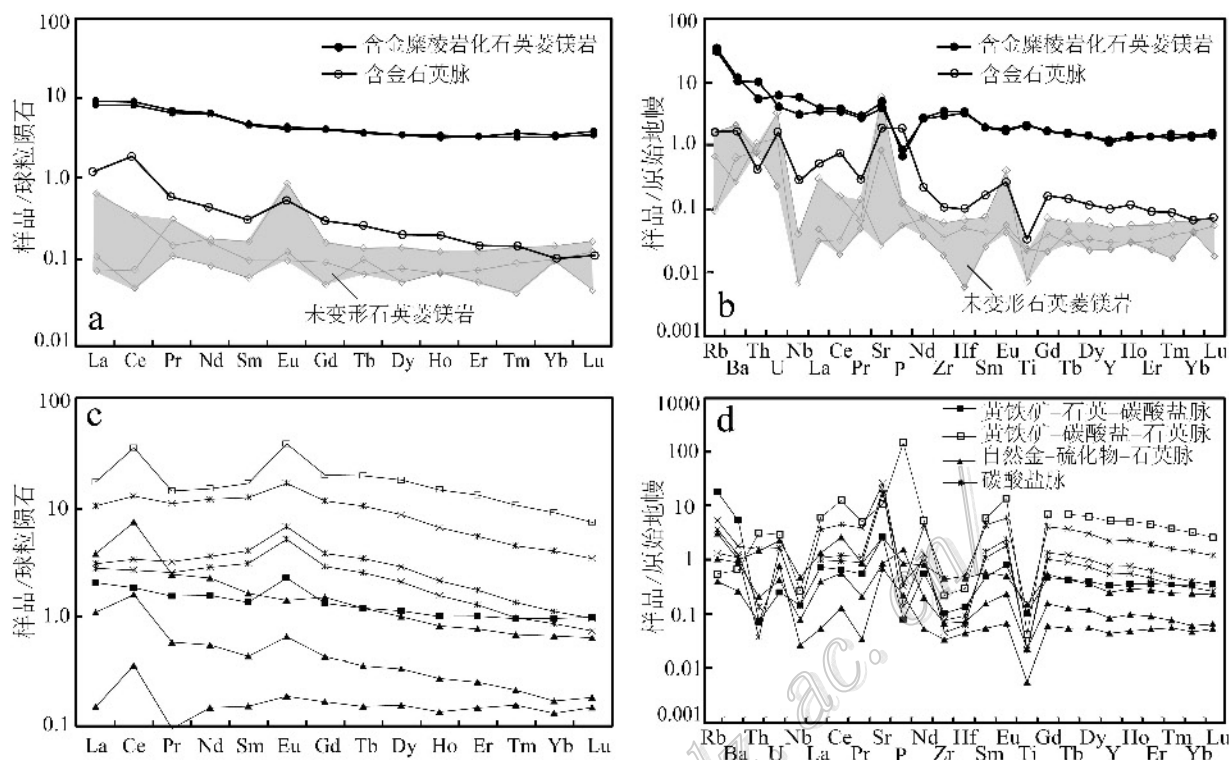


图10 萨I金矿矿石、围岩及脉体的稀土元素配分模式和微量元素蛛网图(c的图例同d, 标准化据 Sun et al., 1989)

Fig. 10 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle normalized multi-element plots for ores, wall-rocks and veins in the No. I Sertohay gold deposit (normalization data after Sun et al., 1989)

化物-石英脉与粗大含金石英脉脉体的差异主要取决于热液充填的裂隙规模。碳酸盐脉的稀土元素配分模式为右倾式, 稀土元素总量较低(平均 13.89×10^{-6}), 轻稀土元素弱富集, $(La/Yb)_N$ 值平均 2.83。具明显 Eu 正异常(δEu 平均为 1.61)。

变价元素 Eu 和 Ce 的异常可以示踪矿脉形成时的氧化还原状态。黄铁矿-石英-碳酸盐脉(阶段 I)、黄铁矿-碳酸盐-石英脉(阶段 III)、自然金-硫化物-石英脉(阶段 IV)和碳酸盐脉(阶段 V)均显示弱 Eu 正异常(δEu 为 1.20~2.10)和弱 Ce 正异常(δCe 为 1.04~2.47)。其中, 自然金-硫化物-石英脉(阶段 IV)以弱 Eu 正异常($\delta Eu=1.2$)和强烈 Ce 正异常($\delta Ce=2.47$)为特征, 说明相对于阶段 I、III 和 V 的热液脉, 自然金-硫化物-石英脉形成于相对还原的成矿环境。

5 讨论

与石英菱镁岩有关的金矿床已经在世界上多个地区被发现, 如加拿大 Atlin 金矿区和 Abitibi 绿岩带金矿区(Kishida et al., 1987; Ash et al., 1990;

Schandl et al., 1992; 2012)、土耳其 Kagizman 金矿区(Tuysuz et al., 1993)、爱尔兰 SMT Cregganbaun 金矿(Halls et al., 1995)、埃及 Barramiya 金矿(Zoheir et al., 2011)、中国陕西煎茶岭金矿(黄婉康等, 1996)和新疆金水泉金矿(聂晓勇, 2010)。金矿体均为赋存在石英菱镁岩中的含金硫化物-石英脉。自然金与黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿和方铅矿共生。此类矿床中还常出现辉砷镍矿、辉砷钴矿、镍黄铁矿、磁黄铁矿和毒砂等矿物, 为金矿化之前结晶的硫化物组合。蛇纹石化过程中, 超基性岩中的 Au 优先进入磁铁矿和镍-砷硫化物中; 在碳酸盐化过程中, 这些金属矿物分解将释放出 Au, 并形成富 Au 和 SiO_2 的流体, 这种流体演化形成含金石英脉(Buisson et al., 1987)。萨I金矿中出现辉砷镍矿、含砷黄铁矿以及自然金-辉砷镍矿-铬云母脉的事实表明, 在形成此类金矿典型的含金石英脉矿化(Au-Cu 矿化)之前, 还发育一期以自然金-辉砷镍矿组合为特征的 Au-As 矿化, 主要沿着或小角度穿切糜棱岩化石英菱镁岩的面理方向产出(图 5b)。脆性变形阶段发育的 Au-Cu 矿化叠加在早期切脆性阶段的 Au-As 矿化

之上(图 5a),指示 2 个金成矿阶段发生的时间不同。除了时间上的差异,韧性剪切带的演化在空间上也显著变化,从深部韧性变形,经历韧脆性变形的转换过程,演化到浅部的脆性变形。这种演化过程反映了构造性质由挤压转变为伸展环境。韧性剪切带的 3 种构造变形出现在同一空间位置的同一种岩石中,可能的解释是石英菱镁岩在韧性剪切带中不断抬升,并经历了韧脆性变形转换到脆性变形过程。除了时间上的差异外,Au-As 和 Au-Cu 成矿作用也发生在剪切带的不同位置。

石英菱镁岩是蛇纹岩热液交代蚀变的产物,通过韧性剪切带抬升到浅部,并在玄武岩与蛇纹岩接触带上就位。断裂带附近的玄武岩和蛇纹岩虽然为石英菱镁岩透镜体所在的围岩,但它们不是石英菱镁岩原岩的围岩,与石英菱镁岩是伴生关系(构造接触)。石英菱镁岩中可见大量含金石英脉,但玄武岩中几乎见不到石英脉,这说明与石英脉有关的热液成矿作用仅发生在剪切带中,与玄武岩没有关系。因此,前人关于萨 I 金矿存在蚀变玄武岩型矿体和成矿物质来源于玄武岩的认识需要重新考虑。本文的系统研究表明,金矿化主要发生在糜棱岩化石英菱镁岩中(图 5a、b),未变形的石英菱镁岩不发育金矿化,说明金成矿作用与石英菱镁岩经历的剪切变形过程密切相关,萨 I 金矿床为受剪切带控制的金矿床。

早期韧脆性变形转换阶段形成的黄铁矿-石英-碳酸盐脉(阶段 I)中 Cr、Ni、Co 的含量明显高于未变形的石英菱镁岩和含金糜棱岩化石英菱镁岩,说明糜棱岩化作用导致岩石中这些元素发生富集,并进入成矿流体中。自然金与铬云母、辉砷镍矿共生(图 6a~c),说明 Au 与 Cr、Ni、Co 关系密切,Au 也是在韧性变形过程中富集进入到剪切带流体中的。含金糜棱岩化石英菱镁岩的微量元素含量明显高于未变形的石英菱镁岩(图 10a、b),说明剪切带流体富集微量元素。韧性变形向脆性变形转换的流体压力或/和温度差是剪切带型金矿中流体运移和 Au 沉淀的主要原因(Loucks et al., 1999; 朱永峰, 2004)。含金石英脉中往往见到石英菱镁岩角砾,角砾棱角分明,被石英脉胶结(图 5f、g),说明发生了流体隐爆作用,体系压力骤降,含 Au 络合物分解,形成含金石英脉。

7 结 论

萨 I 金矿床矿体的围岩包括石英菱镁岩、碳酸

盐-滑石片岩和蛇纹岩。蛇纹岩转变为石英菱镁岩的过程中,伴随岩石发生剪切变形和金矿化。Au-As 和 Au-Cu 两个成矿期分别发生在拉伸环境下韧脆性变形转换和后期脆性变形过程中,形成含金糜棱岩化石英菱镁岩型和含金石英脉型矿体。金矿化与石英菱镁岩经历的剪切变形作用密切相关,剪切带流体输送了相关的微量元素和成矿元素。成矿流体的物理化学条件受剪切带演化过程的控制(早期深部韧性变形、晚期浅部脆性变形),韧性变形向脆性变形转换过程中流体隐爆作用伴随压力的骤降,使含 Au 络合物分解沉淀发生金矿化。萨 I 金矿床是产在糜棱岩化石英菱镁岩中的严格受剪切带控制的热液脉型金矿床。

志 谢 北京大学古丽冰老师指导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,安芳参加了野外工作并提供了诸多帮助,新疆哈图金矿的张凤军和林彩香为野外地质工作提供了诸多便利和协助,《矿床地质》的匿名审稿专家提出了详细的审稿意见和修改建议,对完善本文帮助很大,特此感谢。

参考文献/References

- 曹 烈, 吕正祥, 唐文清, 等. 1998. 新疆西准噶尔哈图-萨尔托海金成矿区成矿系列机成矿模式探讨 [J]. 特提斯地质, (22): 117-125.
- 傅 昆. 2004. 新疆托里县萨尔托海金矿区 I 号矿床成因初探 [J]. 新疆有色金属, 增刊 5-8.
- 黄婉康, 甘先平, 单祖翔, 陈荔湘, 刘 雁. 1996. 陕西煎茶岭金矿区的岩石及成矿时代研究 [J]. 地球化学, 25(2): 150-156.
- 聂晓勇. 2010. 试论蛇绿碳酸岩与金矿化关系——以东准卡拉麦里蛇绿带中金水泉金矿为例 [J]. 黄金科学技术, 18: 38-42.
- 邱 添, 朱永峰. 2012. 新疆萨尔托海石英菱镁岩中发育的韧性剪切带及其对金矿的控制 [J]. 岩石学报, 28: 2250-2256.
- 吴延之. 2012. 新疆西准噶尔哈图-萨尔托海金矿带控矿构造特征及找矿前景分析 [J]. 中国有色金属学报, 22(3): 854-862.
- 吴佐飞. 1992. 新疆托里县萨尔托海 I 号金矿床地质特征及成因初探 [J]. 贵金属地质, 2-3: 182-186.
- 新疆有色金属地质勘探公司. 1986. 萨尔托海 I 号金矿床 I 号蚀变体地质勘查报告 [R].
- 周美付. 1987. 新疆托里萨 I 金矿床的地质特征及成因研究 [J]. 找矿地质论丛, 2(3): 20-30.
- 朱永峰. 2004. 克拉通和古生代造山带中的韧性剪切带型金矿: 金矿

- 成矿条件与成矿环境分析[J]. 矿床地质, 23(4):509-519.
- 朱永峰, 安 芳, 徐存元, 等. 2013. 新疆哈图及其周边金铜成矿规律和深部找矿预测[M]. 北京:地质出版社. 1-161.
- 祝皆水. 1989. 新疆金矿主要成因类型[J]. 新疆地质, 7(4):60-67.
- Ash C H and Arksey R L. 1990. The listwanite-lode gold association in British Columbia[M]. British Columbia Geological Survey Branch. 359-364.
- Barnes I, O'Neill J R, Rapp J B and White D E. 1973. Silica-carbonate alteration of serpentinite: Wall rock alteration in mercury deposits of the California Coast Ranges[J]. Econ. Geol., 68:388-398.
- Buisson G and Leblanc M. 1987. Gold in mantle peridotites from upper Proterozoic ophiolites in Arabia, Mali, and Morocco [J]. Econ. Geol., 80:2091-2027.
- Halls C and Zhao R. 1995. Listvenite and related rocks: Perspectives on terminology and mineralogy with reference to Cregganbaun, Co. Mayo, Republic of Ireland [J]. Mineralium Deposita, 30 (3-4): 303-313.
- Kishida A and Kerrich R. 1987. Hydrothermal alteration zoning and gold concentration at the Kerr-Addison Archean lode gold deposit, Kirkland Lake, Ontario[J]. Econ. Geol., 82(3):649-690.
- Loucks R and Mavrogenes J A. 1999. Gold solubility in supercritical hydrothermal brines measured in synthetic fluid inclusions[J]. Science, 284:2159-2163.
- Ploshko V V. 1965. Listvenitization and carbonatization at terminal stages of Urushten igneous complex, North Caucasus[J]. International Geology Review, 7(3):446-463.
- Robinson P T, Malpas J, Zhou M F, Ash C, Yang J S and Bai W J. 2005. Geochemistry and origin of listwanites in the Sartohay and Luobusa Ophiolites, China [J]. International Geology Review, 47: 177-202.
- Schandl E S and Naldrett A J. 1992. CO₂ metasomatism of serpentinites, south of Timmins, Ontario[J]. The Canadian Mineralogist, 30:93-108.
- Schandl E S and Gorton M P. 2012. Hydrothermal alteration and CO₂ metasomatism (natural carbon sequestration) of komatiites in the south-western Abitibi greenstone belt [J]. The Canadian Mineralogist, 50:129-146.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process [M]. Geological Society of London, Special Publication, 42:313-345.
- Tuysuz N and Erler A. 1993. Geochemistry and evolution of listwaenites in the Kagizman region (Kars, NE-Turkey) [J]. Chemie. der Erde., 53(1-4):315-329.
- Zhu Y F, Chen B, Xu X, Qiu T and An F. 2013. A new geological map of the western Junggar, north Xinjiang (NW China): Implications for Paleoenvironmental reconstruction[J]. Episodes, 36 (3):205-220.
- Zoheir B and Lehmann B. 2011. Listvenite lode association at the Bar-ramiya gold mine, Eastern Desert, Egypt [J]. Ore Geology Reviews, 39:101-115.