

陕西省铍厂沟金矿围岩蚀变和元素迁移特征

林振文^{1,2}, 秦艳^{1*}, 岳素伟³, 周振菊⁴,
王立新⁵, 余康伟⁵

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 华南理工大学 广州学院, 广东 广州 510800; 4. 北京大学 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871; 5. 陕西省
略阳县 铍厂沟金矿, 陕西 略阳 724312)

摘要: 陕西省铍厂沟金矿床位于勉略缝合带以南, 矿体受控于近东西向逆冲断层和韧性剪切带。本文以细碧岩矿带为例, 系统研究了围岩蚀变分带及蚀变矿物组合, 总结了矿床的蚀变分带模式。围岩蚀变以穿切细碧岩透镜体的剪切带为中心向外依次可划分为黄铁绢英岩化带、绢云碳酸盐化带和绿泥赤铁矿化带。蚀变矿物组合分别为黄铁矿+铁白云石+铬云母+绢云母+钠长石+石英+方解石、铁白云石+绢云母+钠长石+石英±黄铁矿、(铁)绿泥石+钠长石+铁白云石+赤铁矿+钛铁氧化物+石英±绿帘石。蚀变岩石组分迁移分析表明, 在围岩蚀变过程中, SiO_2 、 Na_2O 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、 MgO 与 Y 等组分发生不同程度的迁出, K_2O 、 CaO 、Ba、Rb、Sr、Cr、Cu、Pb 和挥发组分等迁入, 并以黄铁绢英岩化带最为显著。金在成矿流体中以 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 络合物迁移, 成矿流体与富铁细碧岩之间的反应是金沉淀重要机制。

关键词: 造山型金矿; 蚀变分带; 元素迁移; 铍厂沟金矿; 陕西省

中图分类号: P595; P618.51; P614 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2014)06-0602-17

Wall-rock alteration and element migration of the Huachanggou Gold Deposit, Shaanxi Province

LIN Zhen-wen^{1,2}, QIN Yan^{1*}, YUE Su-wei³, ZHOU Zhen-ju⁴, WANG Li-xin⁵ and YU Kang-wei⁵

1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Guangzhou College, South China University of Technology, Guangzhou 510800, China;
4. MOE Key Laboratory of Orogen and Crust Evolution, Peking University, Beijing 100871, China;
5. Huachanggou Gold Mine of Lueyang County in Shaanxi Province, Lueyang 724312, China

Abstract: The Huachanggou gold deposit in Shaanxi province is located to the south of Mianlue suture zone. The ore bodies are mainly controlled by EW trending reverse faults and ductile-brittle shear zones. Based on detailed study of alteration mineral association in the main ore zone that hosted in the spilite tectonic lens, an alteration zoning model has been established. The wall rock alteration can be divided into three alteration zones outward from the shear center: pyrite - phyllic alteration zone, sericite - carbonate alteration zone, chlorite - hematite alteration zone. The alteration mineral associations are pyrite + ankerite + fuchsite + sericite + albite + quartz + calcite, ankerite + sericite + albite + quartz ± pyrite, and chlorite + albite + ankerite + hematite + ilmenite oxide + quartz ± epidote, respectively. The elements migration analysis showed that SiO_2 , Na_2O , $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$, MgO and Y occur to move out in varying degrees, while K_2O , CaO , Ba, Rb, Sr, Cr, Cu, Pb and volatile components move in during alteration. The most intensive migration occurred in the pyrite phyllic alteration zone. Gold is mainly transported as $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ complex in the hydrothermal fluids. It seems that fluid-rock interaction between ore-forming fluid and Fe-rich spilite plays an important role in gold precipitation.

Key words: orogenic gold deposit; alteration zoning; element migration; the Huachanggou gold deposit; Shaanxi Province

收稿日期(Received): 2014-03-12; 改回日期(Revised): 2014-03-27; 接受日期(Accepted): 2014-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(40730421, 40425006); 全国危机矿山接替资源找矿项目(20089934)

作者简介: 林振文(1986-), 男, 博士研究生, 矿床学专业。E-mail: linzhenwen9704@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): QIN Yan, E-mail: qinyan@gig.ac.cn, Tel: +86-20-85290793

0 引 言

铔厂沟金矿床位于陕西省西南部略阳县郭镇境内。矿床发现与研究始于 20 世纪 80 年代，当时发现了赋存于细碧岩中的细碧岩矿带(AuM)；本世纪初期勘探发现了碳质灰岩及生物碎屑灰岩中的灰岩矿带，包括南矿段(Au_I)与北矿段(Au_{II})，金资源量超过 20 t，且仍具有较大的找矿潜力。由于铔厂沟金矿床赋存于两套性质截然不同的围岩中，矿石类型特殊，前人虽在地质特征、成矿流体和稳定同位素等方面做过不少研究，但关于矿床成因类型仍有较大争议：白忠^[1]最初认为是热液蚀变细碧岩型；魏刚锋等^[2-4]根据灰岩矿带的构造研究，认为是韧性剪切带型；张复新等^[5]、陈衍景等^[6]和宗静婷^[7]将其归为类卡林型；周振菊等^[8-9]根据流体包裹体及

同位素研究，将其归为造山型金矿床。值得指出的是，前人对铔厂沟金矿围岩蚀变特征与成矿关系未作专门研究，为此笔者以具有明显蚀变特征的细碧岩矿带(AuM)为对象，对矿体产状、蚀变矿物组合、蚀变分带特征和其与金矿化的关系进行系统研究，总结其蚀变分带模式，详细分析蚀变岩石物质组分迁移特征，以期对金的迁移与沉淀机制进行探讨，进一步揭示矿床的形成机制。

1 区域地质背景

陕西省铔厂沟金矿床位于秦岭造山带勉略缝合带以南 4 km，西秦岭-松潘构造结北界^[10-13](图 1)。勉略缝合带经历了古生代洋盆打开、早中生代(晚三叠纪)开始闭合并发生陆陆碰撞^[13-14]、中生代叠加了陆内造山作用一系列地质过程，是连接扬子板块

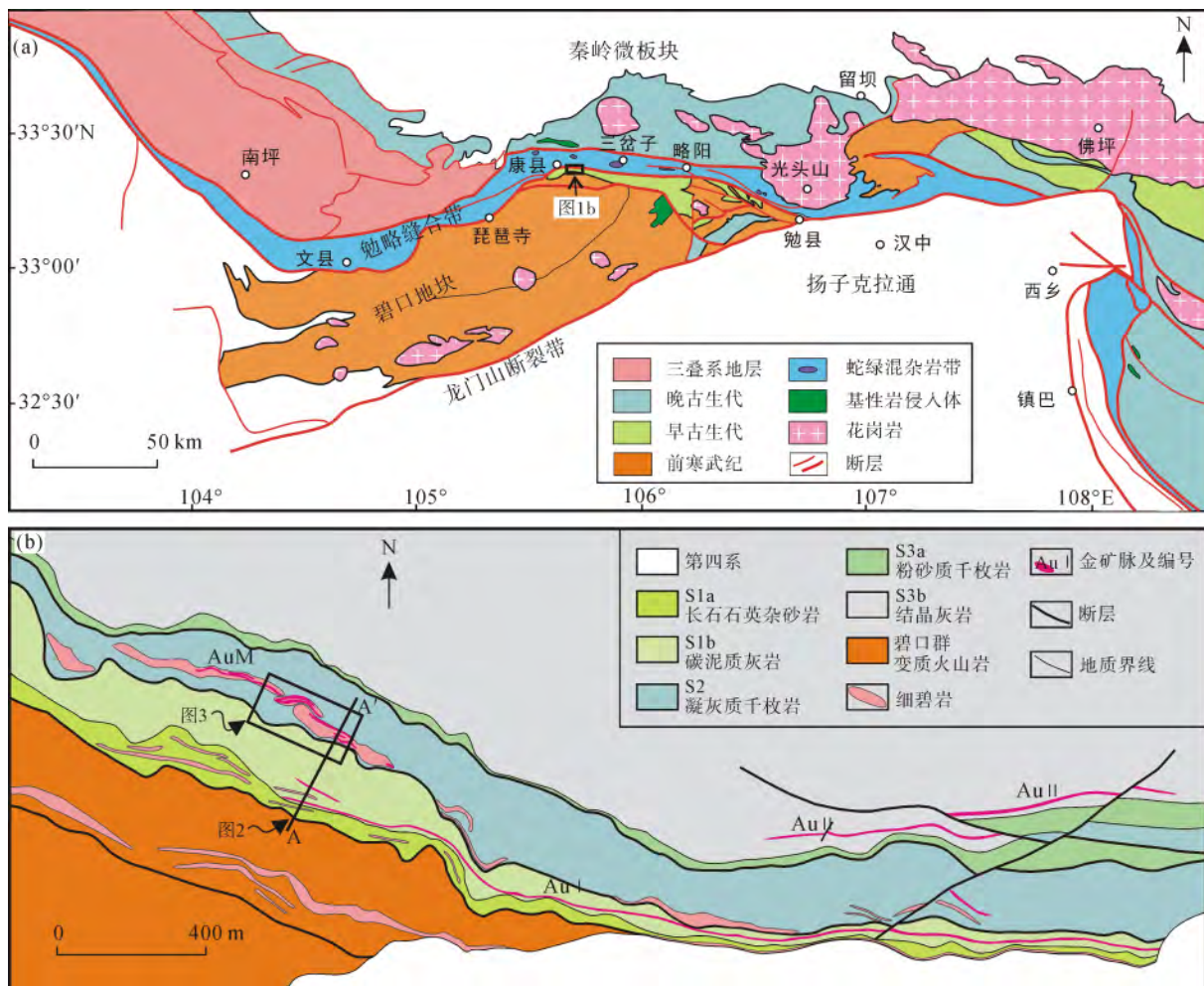


图 1 区域地质图(a, 据文献[12])和铔厂沟金矿床地质简图(b, 据文献[13])

Fig.1 Regional geological map (a, from [12]) and simplified geologic map of the Huachanggou gold deposit (b, from [13])

与秦岭微板块的构造混杂带^[10-12,14-17],它主要由一系列指向南的叠瓦状逆冲推覆体构成^[10-12,18]。其出露的岩石地层主要为构造带南侧碧口群及缝合带内构造混杂岩^[19-23]。碧口群位于扬子板块西北缘,为一套新元古代绿片岩相到角闪岩相变质火山-沉积岩建造^[19]。构造混杂岩由一系列不同性质、不同时代构造岩片无序堆叠而成,主体上发育泥盆-石炭系岩石建造,包括不同类型的火山岩、不同构造环境的沉积岩及以不同方式就位的外来岩块^[20-23]。火山岩组成复杂,包括洋壳蛇绿岩、岛弧火山岩、洋岛火山岩、双峰式火山岩等^[21,24-29],其形成时代从新元古代到中生代^[13,17,24,25]。侵入岩主要以中生代酸性岩浆岩为主^[15,16,30]。

2 矿床地质

铀厂沟金矿床赋存于勉略构造混杂带南缘的一套由叠瓦状逆冲断层控制的逆冲岩片(三河口群)中(图1)。自南向北可识别出5个逆冲岩片(S1至S5),分别为: S1岩片,由长石石英杂砂岩夹含碳泥质粉砂岩(S1a)和碳质灰岩、生物碎屑灰岩(S1b)组成; S2岩片,凝灰质干枚岩夹细碧岩构造透镜体; S3岩片,由石英砂岩、泥质粉砂质干枚岩(S3a)及中厚层生物碎屑灰岩、结晶灰岩和微晶灰岩(S3b)组成; S4岩片,凝灰质火山岩夹细碧岩构造透镜体; S5岩片,结晶灰岩。其中S2及S4岩片为新元古代火山岩,铀石U-Pb年龄为 (801.7 ± 4.7) Ma^[13];其他岩片为泥盆系沉积岩^[22]。该套构造岩片近东西向展布,产状单斜、北倾,呈叠瓦状排列,南侧逆冲于新元古界碧口群之上,北侧与石炭系略阳组灰岩呈断层接触。矿床细碧岩矿带(AuM)主要分布于矿区西部(图1b),赋存在S2岩片中细碧岩透镜体及少量凝灰质干枚岩中;灰岩矿带分布于矿区东部,可分为南矿段(Au_南)和北矿段(Au_北),分别赋存在S1b碳质灰岩及S2b厚层状生物碎屑灰岩中(图1b)。需要说明的是,在最近的调查中发现S1a长石石英杂砂岩中也有明显矿化,并含有较多的胶状黄铁矿及草莓状黄铁矿^[4],目前尚在勘察阶段。

矿体受一系列的自北向南逆冲断层及韧性剪切带控制(图1b)。逆冲断层系及相应的韧性剪切带南北宽约2 km,东西长超过15 km,沿走向及倾向均波状起伏,北倾,倾角 $30^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 。逆冲断层在寨子湾矿段发生倒转,形成宽缓的平卧褶皱,地层在

标高1250 m以上发生南倾(图2)。强烈的构造运动导致该区的地质遭受普遍构造面理置换,强变形域岩石变质为钙质糜棱岩、糜棱岩及千糜岩等动力变质岩。除新元古代火山岩外,矿区及附近无后期未变质侵入岩及火山岩出露。

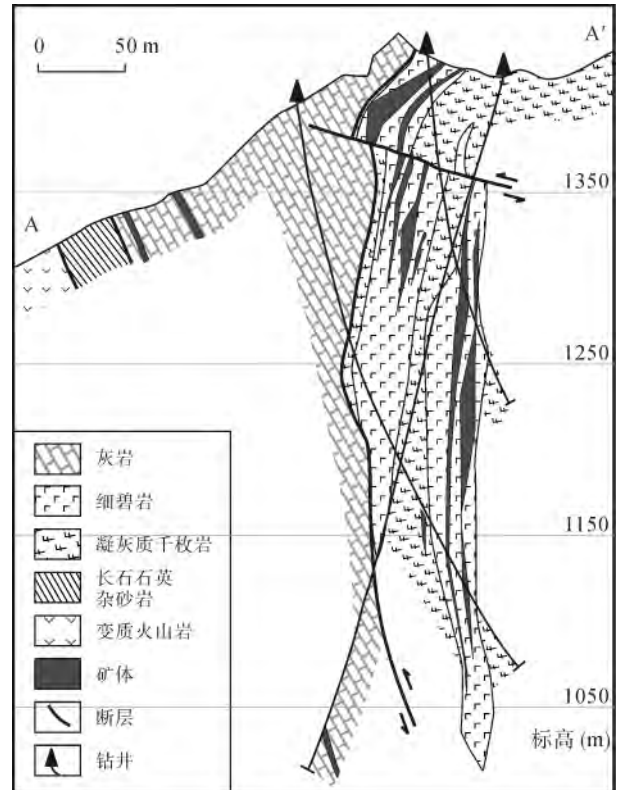


图2 铀厂沟金矿床16号勘探线(图1b中A-A')剖面图
Fig.2 Geological section map of the No.16 prospecting line (A-A' in Fig.1b)

细碧岩矿带赋矿围岩为S2岩片内的细碧岩透镜体(图3),呈“右行斜列”裹挟在凝灰质干枚岩中,长40~500 m不等(集中在40~200 m),宽5~50 m。在15个透镜体中分布了21个工业矿体。矿体在剖面上呈雁行状排列,透镜状产出,延长(沿走向)小于延深(沿倾向):最长265 m,最短20 m,一般33~210 m;最厚16 m,最薄1 m,一般2~10 m;延深大于500 m。矿体沿走向、倾向均呈舒缓波状,总体北倾(倾角 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$),局部南倾(倾角 $70^{\circ} \sim 88^{\circ}$)。各矿体厚度一般比较稳定,连续性较好,局部有加大变厚现象,如平卧褶皱的枢纽及倒转翼(图2)。

3 矿石结构构造

细碧岩矿带矿石类型主要为蚀变岩型,含少量石英脉型。金品位 $3.10 \sim 5.96 \mu\text{g/g}$,平均 $4.5 \mu\text{g/g}$ 。

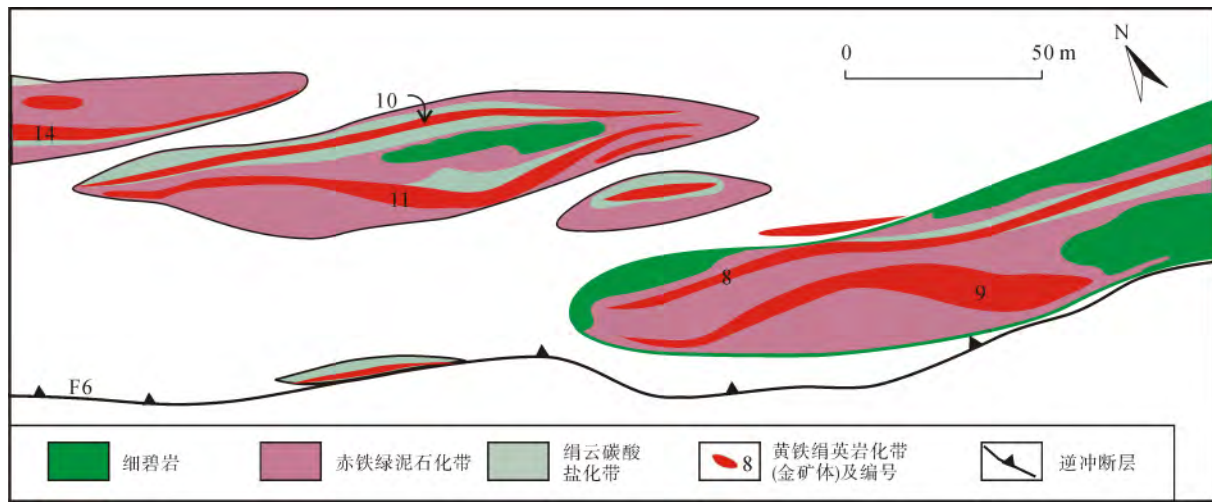


图 3 铔厂沟细碧岩矿带矿体形态及蚀变分带简图¹⁾

Fig.3 Main orebodies and alteration zones of the Huachanggou gold deposit¹⁾

石英脉型矿石分布于剪切带中心, 可以分为断裂充填脉、剪切形成的张性脉。矿石主要矿物为钠长石、石英、铬云母和方解石, 含少量黄铁矿、自然金、磷钼矿、独居石、金红石等; 蚀变岩型矿石分布于剪切带或石英-钠长石脉周围。蚀变岩型矿石金属矿物以黄铁矿为主(1%~10%), 含有少量的黄铜矿、斑铜矿、闪锌矿、方铅矿、毒砂、自然金等, 微量矿物为辉砷钴矿、硫镍钴矿。非金属矿物以钠长石(~30%)、碳酸盐矿物(~35%)、绢(铬)云母(~20%)和石英(~10%)为主, 其中碳酸盐矿物以铁白云石及方解石为主, 含少量白云石和菱铁矿。黄铁矿呈浸染状、细脉状分布于细碧岩中, 在围岩与石英脉接触部位发育。

蚀变岩型矿石结构以自形粒状结构为主, 含部分半自形他形粒状结构, 其次为包含嵌晶结构、交代残余结构、环带结构、鳞片变晶结构。矿石构造主要有脉状构造、浸染状构造, 其次为角砾状构造等。

4 围岩及蚀变分带特征

围岩蚀变类型与分布受岩性、变质程度与脉体的发育程度影响^[31]。铔厂沟金矿细碧岩矿带围岩为低绿片岩相的墨绿色细碧岩, 沿剪切带中心发生强烈的热液蚀变作用, 主要有黄铁矿化、碳酸盐化、硅化、绢云母化、钠长石化, 其次是绿泥石化、绿帘石化等, 侧向蚀变分带特征明显。在详细的野外观察及镜下鉴定的基础上, 根据蚀变强度及蚀变矿物组合的不同将赋矿围岩由剪切带中心(脉体)向外分为 3 条蚀变带(图 3, 4 a): 浅绿-翠绿色黄铁绢英岩化带(图 4 b)、黄绿色绢云碳酸盐化带(图 4 c)和紫红色绿泥赤铁矿化带(图 4 c)。热液蚀变叠加在区域变质的细碧岩上。各蚀变带特征及矿物组合见图 5 及表 1, 其中黄铁绢英岩化带不包括剪切带内的石英-钠长石脉。

表 1 铔厂沟金矿床围岩蚀变带特征

Table 1 Characteristics of wall-rock alteration zones of the Huachanggou gold deposit

蚀变分带	蚀变类型	颜色	主要矿物	次要矿物	结构构造
细碧岩	区域变质	墨绿色	阳起石、绿帘石、钠长石	绿泥石、赤铁矿、铁白云石、石英	间隐结构、定向构造、杏仁状构造
绿泥赤铁矿化带	绿泥石化+赤铁矿化+碳酸盐化	紫红色	绿泥石(铁绿泥石)、钠长石、铁白云石	铁钛氧化物、石英、绿帘石、铁白云石、菱铁矿	间隐结构、交代残余结构、定向构造
绢云碳酸盐化带	绢云母化+碳酸盐化+钠长石化	黄绿色-浅黄色	铁白云石、铁绿泥石、铬云母、绢云母、钠长石、石英	菱铁矿、方解石、金红石、黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿	交代残余结构、块状、细脉状构造
黄铁绢英岩化带	铬云母化+绢云母化+碳酸盐化+黄铁矿化+钠长石化	浅黄绿色-翠绿色-灰白色	黄铁矿、铬云母、绢云母、铁白云石、钠长石	石英、白云石、方解石、铁绿泥石、金红石、黄铜矿、斑铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉砷钴矿、硫砷铜矿、毒砂、自然金	交代残余结构、块状、细脉状构造

1) 陕西省地质矿产勘查开发局汉中地质大队, 陕西省略阳县铔厂沟金矿床细碧岩矿带 1039 中段平面图, 2007。

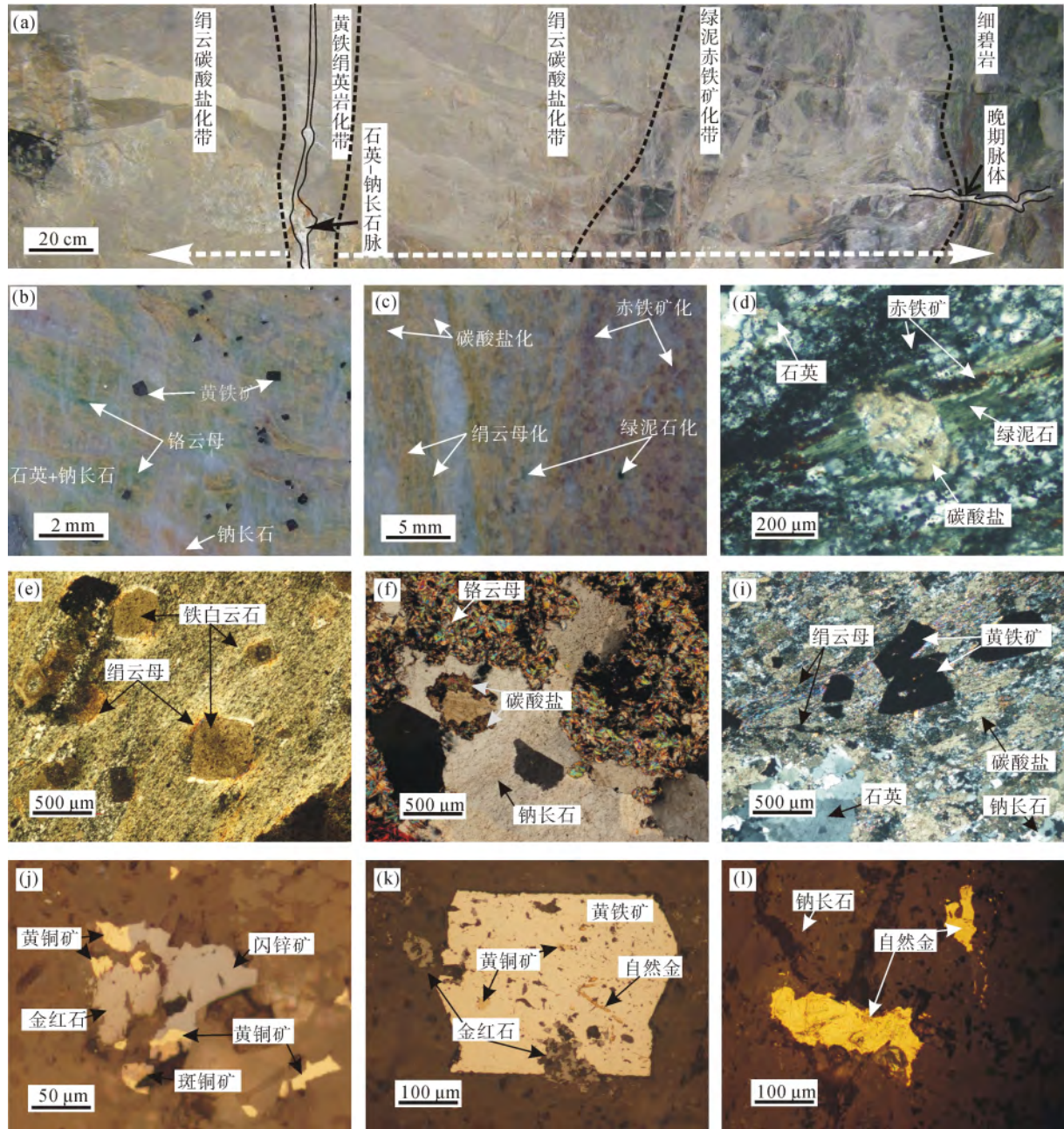


图4 铀厂沟细碧岩矿带蚀变分带、岩石及矿石矿物特征

Fig.4 Alteration zoning, petrological and mineralogical characteristics of the Au M

(a) 细碧岩矿带 1130 中段 8 号矿体蚀变分带特征, 剪切带中心充填石英-钠长石脉, 往外依次可以划分为黄铁绢英岩化带、绢云碳酸盐化带和绿泥赤铁矿化带; (b) 黄铁绢英岩化带矿石特征; (c) 红色为绿泥赤铁矿化, 黄绿色为绢云碳酸盐化, 两者渐变接触; (d) 绿泥石+赤铁矿+碳酸盐交代了绿帘石-阳起石(正交); (e) 铁白云石具绢云母压力影, 基质为定向排列的细粒绢云母、钠长石、石英以及铁钛氧化物; (f) 铬云母交代钠长石变斑晶呈港湾状(正交); (g) 黄铁矿+铬云母+石英+碳酸盐矿物共生组合(正交); (h) 黄铜矿、闪锌矿、斑铜矿及金红石共生(反光); (i) 黄铁矿与黄铜矿、金红石及自然金共生(反光); (j) 自然金分布于热液成因的钠长石中(反光)。

4.1 细碧岩

围岩蚀变带边缘为墨绿-深绿色弱热液蚀变的细碧岩(图 4a)。细碧岩经历多期剪切作用^[3], 在弱变形的区域可识别出间隐结构、交织结构, 杏仁状、斑杂状与定向构造, 其主要矿物组合为钠长石+绿

帘石+阳起石+绿泥石+碳酸盐, 含少量的石英、赤铁矿及铁钛氧化物。钠长石呈板状、燕尾状、三角架状或糖粒状集合体。板状单晶往往具有扭曲或波状消光现象。糖粒状集合体是钠长石受强烈的剪切作用发生细粒化的钠长石静态重结晶的产物。钠长石在重结晶过程中包裹了残留的构造行迹, 如定向排

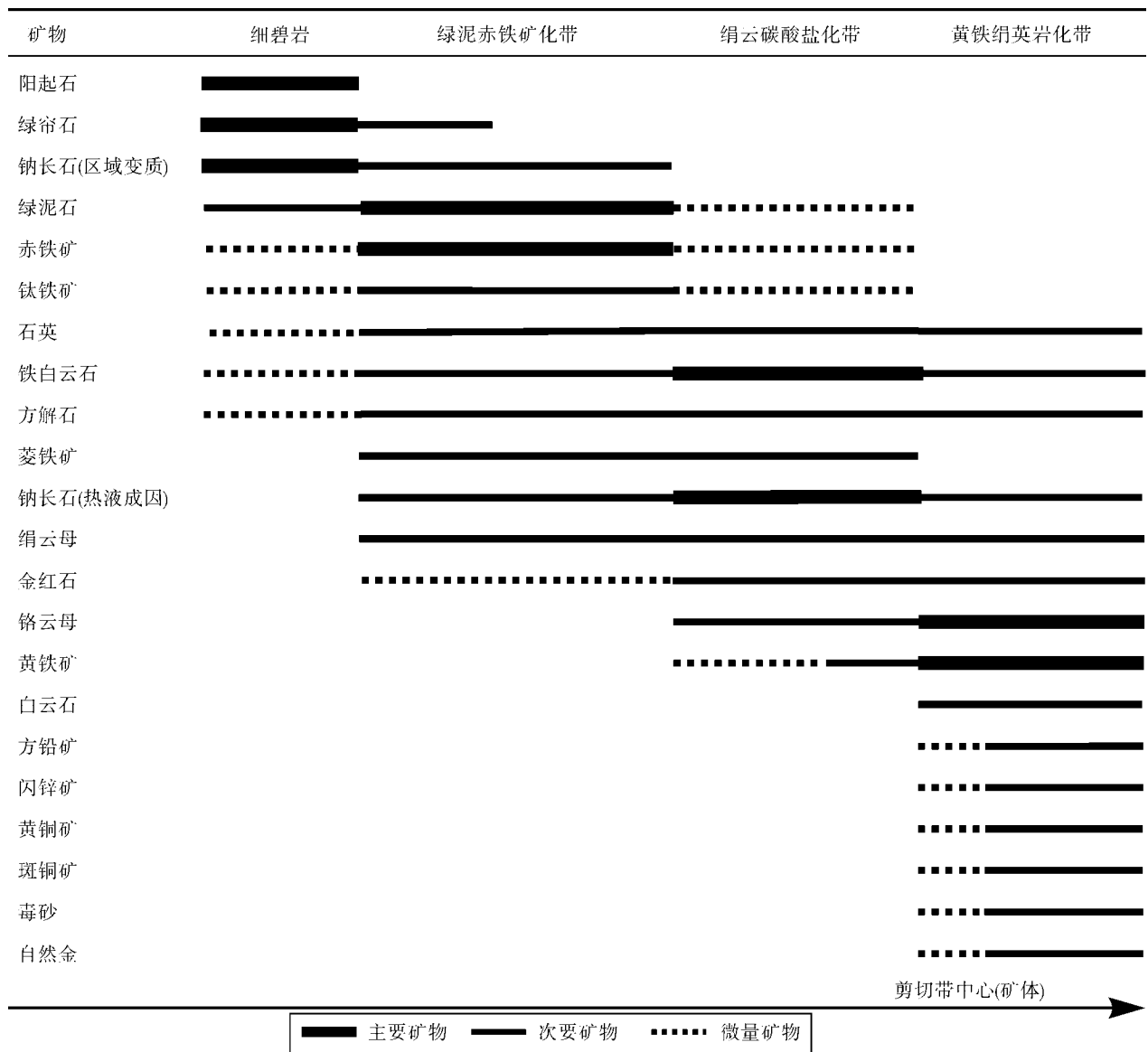


图 5 铔厂沟金矿床蚀变分带及矿物组合

Fig.5 The alteration zoning and mineral assemblage of the Huachanggou gold deposit

列绢云母、赤铁矿等。细碧岩中的杏仁体成分为石英、绿帘石、绿泥石及方解石,定向排列。地球化学研究表明,该套火山岩透镜体具有低 K、Ti,高 Na、Mg 的特征,其原岩为是一套陆弧环境形成的亚碱性玄武岩^[13]。细碧岩可能是玄武质火山岩经历低绿片岩相区域变质作用(洋底埋藏变质作用)发生细碧岩化的结果^[13, 19, 32]。热液蚀变以弱碳酸盐化为主,晚期形成绿帘石-石英脉和碳酸盐脉(图 4 a)。

4.2 黄铁绢英岩化带

黄铁绢英岩化带位于剪切带或石英-钠长石脉周围,是矿区最为强烈的蚀变带,原岩基本完全蚀变,矿物组成复杂,主要矿物有黄铁矿、铬云母、绢

云母、铁白云石、钠长石和石英,含有少量的白云石、方解石,微量矿物有针状金红石、黄铜矿、斑铜矿、方铅矿、闪锌矿、斜黝帘石、辉砷钴矿、硫砷铜矿、毒砂、磷钼矿及自然金等(图 4j、4k 和 4l)。铬云母与载金矿物黄铁矿密切共生(图 4f 和 4i),并导致蚀变带呈黄绿色,矿体呈翠绿色,是矿体最重要的鉴别标识之一。蚀变带被后期方解石细脉、钠长石细脉、白云石-钠长石脉穿切,但围岩矿物成分未发生明显变化。

该蚀变带中具有工业意义的蚀变岩即为矿石。黄铁矿是最主要的载金矿物,呈浸染状或脉状分布在蚀变岩中(图 4b)。自然金颗粒多为小于 0.07 mm 的显微金,以裂隙金为主,次为包体金和晶隙金^[33],

主要分布在黄铁矿及其裂隙中,部分浸染状分布在黄铁绢英岩化蚀变带中(图 4l),与钠长石、铬云母等共生。

4.3 绢云碳酸盐化带

绢云碳酸盐化带蚀变程度较黄铁绢英岩化带弱,但强于绿泥赤铁矿化带,三者呈渐变过渡关系(图 4c)。绢云碳酸盐化带很少保留间隐结构,反映了较多流体进入和组分的迁移。其主要矿物组成为碳酸盐+钠长石+绢云母+石英(图 4e 和 4f),含金红石、黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿。绢云母、铁白云石及石英交代绿泥石。钠长石多为他形变斑晶及板状自形晶体(图 4f),与细碧岩残留的糖粒状、三角架状及波状消光的板状结构不同,为热液成因。鳞片状绢云母或铬云母交代钠长石斑晶(图 4f),表明其形成略晚于钠长石。黄铁矿呈斑点状或细脉状分布,显微镜下可见斑点状黄铜矿和斑铜矿。碳酸盐矿物主要可以分为 3 种:铁白云石、菱铁矿及方解石,其中以铁白云石为主。

绢云碳酸盐化带发育大量微型韧性剪切带,片理化强烈,这为热液流通提供了良好的通道,引起强烈的蚀变。

4.4 绿泥赤铁矿化带

绿泥赤铁矿化带与绢云碳酸盐化带相邻,其典型特征是富铁绿泥石-碳酸盐-铁钛氧化物不完全交代细碧岩中的绿帘石-阳起石(图 4c 和 4d)。常见的矿物组合为富铁绿泥石+钠长石+铁白云石+铁钛氧化物+菱铁矿+石英±绿帘石。

绿泥石化带在弱剪切区域残留间隐结构。蚀变带中发育有自形粗粒的热液钠长石脉,穿切糖粒状钠长石。铁钛氧化物(赤铁矿+钛铁矿)广泛分布,多为细粒,呈雾状或条带状分布。该蚀变带因含有大量的赤铁矿而呈深红色,与深绿色细碧岩及黄绿色-浅黄色的绢云碳酸盐化带相区别。

5 蚀变带中的矿物学特征

围岩蚀变过程中,围岩与脉体(即热液通道)的远近制约着水岩比值的大小,同时也影响了蚀变的强度和矿物组合^[34]。同时,由于热液活动的持续性或脉动性,会导致热液矿物产生成分分带。

碳酸盐矿物是铀厂沟细碧岩矿带中最常见的蚀变矿物,同时也是重要的找矿标志。前人也注意到

碳酸盐化对金矿化的重要作用^[35],以及对流体活动及矿化过程的指示意义^[35]。在细碧岩矿带碳酸盐矿物包括铁白云石、菱铁矿、白云石和方解石,其种类在蚀变带中的分布受围岩岩性和黄铁矿化强度的影响。

铁白云石 可见于各蚀变带,是细碧岩矿带中最常见的碳酸盐矿物。铁白云石具有明显的 Fe-Mg 成分分带(图 6a 和 6b),Fe 含量在矿物核部较高而边部降低。电子探针数据显示(表 2):早中阶段铁白云石中 FeO 含量范围为 17%~21%,晚阶段为 14%~16%。MnO 的含量均低于 1%,从核心向外有增高的趋势,反映了流体成分的变化。黄铁绢英岩化带中的铁白云石 FeO 含量较其他蚀变带低(表 2),含量范围为 10%~13%。在同一视域下,远离黄铁矿的铁白云石中 FeO 含量增高(图 6d)。

菱铁矿 主要分布在细碧岩、绿泥赤铁矿化带及绢云碳酸盐化带,常与铁白云石共生,特别是富铁白云石,但未在黄铁绢英岩化带中发现。菱铁矿自形或半自形,具明显的成分分带特征(图 6b 和 6c),表明 Fe-Mg 类质同像不均。成分分带规律性不明显,可能是受原岩成分的影响。

方解石 可见于各蚀变带,含量较少,晚期的方解石细脉切穿早期的钠长石或黄铁矿。

白云石 分布在黄铁绢英岩化带中的脉体中,与钠长石一起形成钠长石-白云石脉。

金红石 是各蚀变带中普遍存在的含钛矿物。它可以分为 2 类:第 1 类金红石呈板状或柱状残骸出现(图 6e),分布于各蚀变带,可能是阳起石或角闪石等发生退蚀变或热液蚀变过程中释放出 Ti 而形成的;第 2 类金红石呈自形针状或针束浸染状分布在黄铁绢英岩化带和绢云碳酸盐化带中(图 4e 和 4f),与黄铁矿(图 4k)和其他硫化物(图 4j)及钠长石等热液矿物共生,表明与成矿热液活动相关。

黄铁矿 在细碧岩矿带中可以分为早、中、晚三个阶段。早阶段黄铁矿(Py_I)为自形细粒集合体,主要分布在凝灰质千枚岩中,发生剪切变形。中阶段黄铁矿(Py_{II})是矿区最重要的载金矿物,浸染状分布于黄铁绢英岩化带中。该阶段黄铁矿含大量热液成因铁白云石、绢云母、钠长石及金红石包裹体(图 6d),与少量黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等硫化物共生,并含自然金包裹体(图 4k)。Py_I 具较高的 Au 及 As 含量,As 0.24%,Au 0.05%(图 6d,表 3),As 与 Au 关系不明显。晚阶段黄铁矿(Py_{III})围绕 Py_I 生长。

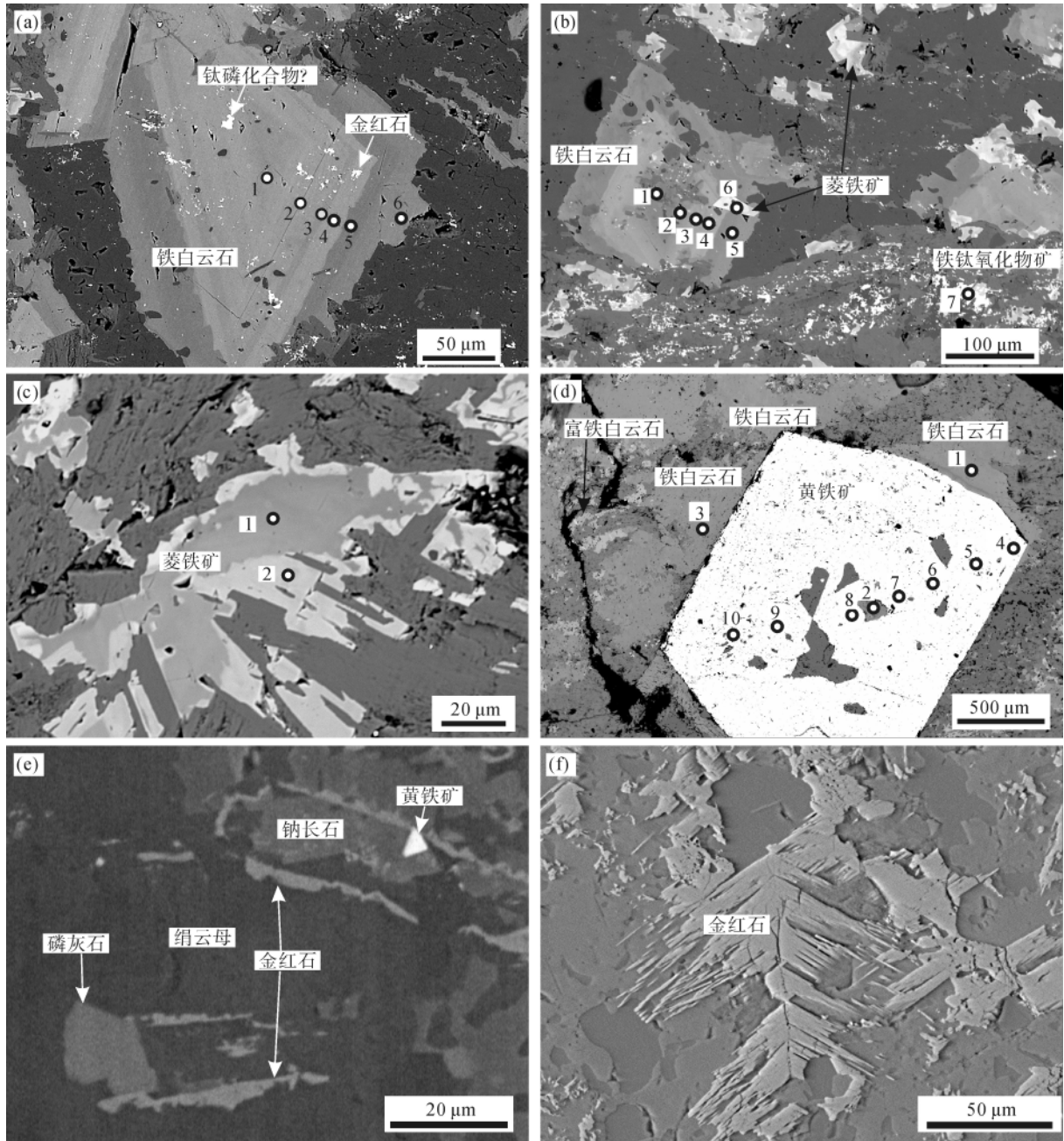


图 6 蚀变带矿物背散射图像及电子探针测试点位置图(成分见表 2 和表 3)

Fig.6 Back scatter images of minerals, showing locations of microprobe analyses presented in Table2 and Table 3

(a) 铁白云石具 Fe-Mg 成分分带, 亮白色环带为富铁区域, 同时包裹了金红石及钛-磷化合物; (b) 铁白云石及菱铁矿具 Fe-Mg 成分分带, 铁白云石交代方解石形成雾心亮边结构, 铁钛氧化物呈条带状分布; (c) 菱铁矿具 Fe-Mg 成分分带; (d) 菱铁矿及铁白云石共生, 远离菱铁矿的铁白云石 Fe 含量增高; (e) 金红石呈板状或柱状矿物残骸出现, 可能是角闪石或阳起石被交代残余的产物, 与黄铁矿、磷灰石、钠长石及绢云母共生; (f) 针状金红石。

赤铁矿与铁钛氧化物 或以微细粒浸染状、条带状分布在绿泥赤铁矿化带中, 残留了早期构造变形行迹(图 6b), 或呈环带状呈现角闪石或阳起石假像, 与第 1 类金红石相似。

钠长石 分为 3 种类型: 第 1 类为板状、燕尾状、三角架状或糖粒状钠长石(详见 4.1 节), 表面

较脏, 边界凹凸不平; 第 2 类为自形板状钠长石, 含部分变斑晶, 分布于绢云碳酸盐化带及黄铁矿绢岩化带, 或以脉体出现(图 4), 这类钠长石边界清晰, 表明干净, 与黄铁矿共生; 第 3 类为晚期钠长-碳酸盐细脉体。

白云母 可以分为 2 类: 第 1 类是与钠长石、

表2 碳酸盐及铁氧化物电子探针分析结果(%)

Table 2 Electron microprobe analysis (%) of carbonate and iron oxide

样品号	矿物	点号	MgO	CaO	MnO	FeO	Total
1030405	铁白云石	图 6a-1	10.43	30.02	0.12	21.34	61.91
1030405	铁白云石	图 6a-2	10.00	28.95	0.13	18.72	57.80
1030405	铁白云石	图 6a-3	11.09	29.16	0.17	17.05	57.47
1030405	铁白云石	图 6a-4	9.72	28.89	0.18	18.56	57.35
1030405	铁白云石	图 6a-5	14.26	30.08	0.63	13.99	58.96
1030405	铁白云石	图 6a-6	13.33	29.46	0.34	16.88	60.00
1030404	铁白云石	图 6b-1	13.19	29.81	0.09	12.98	56.07
1030404	铁白云石	图 6b-2	9.98	29.01	0.17	18.92	58.08
1030404	铁白云石	图 6b-3	10.15	28.54	0.13	18.26	57.07
1030404	铁白云石	图 6b-4	9.89	29.16	0.22	20.43	59.70
1030404	铁白云石	图 6b-5	12.93	29.24	0.43	14.00	56.61
1030404	菱铁矿	图 6b-6	11.65	0.44	0.23	47.47	59.79
1030404	铁钛氧化物	图 6b-7	0.01	na	0.03	39.48	39.52
1030404	菱铁矿	图 6c-1	23.18	0.32	0.25	36.41	60.17
1030404	菱铁矿	图 6c-2	15.09	0.42	0.71	43.73	59.94
1030404	铁白云石	图 6d-1	12.08	30.20	0.23	13.24	55.75
1030404	铁白云石	图 6d-2	11.89	30.11	0.59	12.82	55.41
1030404	铁白云石	图 6d-3	11.00	30.43	1.95	9.92	53.30
1150281	方解石	1	na	37.20	na	na	37.20
1150281	方解石	2	na	37.02	na	na	37.02

注: 分析仪器为中国科学院广州地球化学研究所同位素国家重点实验室的 JEOL JXA-8100, 工作条件为加速电压 15 kV, 束流(3.000 ± 0.002) E-0.8 A, 束斑 1 μm, 大部分元素分析时间为 10 s, ZAF 校正; na 为低于检出限。

表3 黄铁矿电子探针分析结果(%)

Table 3 Electron microprobe analysis (%) of pyrite

样品号	矿物	点号	Fe	S	As	Au	Total
1030404	黄铁矿	图 6d-4	47.76	50.33	0.11	0.05	98.24
1030404	黄铁矿	图 6d-5	48.96	51.18	0.10	0.02	100.26
1030404	黄铁矿	图 6d-6	45.81	48.02	0.24	0.01	94.08
1030404	黄铁矿	图 6d-7	48.89	50.92	0.01	0.01	99.83
1030404	黄铁矿	图 6d-8	46.63	50.14	0.01	na	96.77
1030404	黄铁矿	图 6d-9	47.50	51.09	0.03	na	98.62
1030404	黄铁矿	图 6d-10	48.39	51.30	0.02	na	99.72
1150281	黄铁矿*	1	48.59	51.91	na	0.03	100.53
1150281	黄铁矿*	2	49.36	51.73	0.14	0.03	101.25
1150281	黄铁矿*	3	49.13	51.92	0.02	na	101.07
1150281	黄铁矿*	4	48.39	51.80	na	na	100.19
1150281	黄铁矿*	5	47.57	50.59	0.02	0.02	98.20
1150281	黄铁矿*	6	47.98	51.72	na	0.02	99.71
1150281	黄铁矿*	7	48.63	51.84	0.01	na	100.48
1150281	黄铁矿*	8	48.89	52.07	na	na	100.96

注: 分析方法同表 2; na 为低于检出限; 带星号的黄铁矿为样品 1150281 中黄铁矿横截面。

石英共生的形成于强剪切带中的定向排列的绢云母(图 4e); 第 2 类是与热液活动相关的含 Cr 的粗粒铬

云母, 主要由交代钠长石(包括热液成因的钠长石)形成(图 4f)。铬云母中发现少量自然金, 表明该期云母与成矿热液活动相关。

综上所述, 各类碳酸盐矿物在各蚀变带分布受原岩成分及黄铁矿化影响。在绿泥赤铁矿化带以铁白云石、菱铁矿及方解石为主; 绢云碳酸盐化带铁碳酸盐含量增高, 赤铁矿减少; 黄铁绢英岩化带铁白云石 Fe 含量降低, 菱铁矿和赤铁矿消失, 形成黄铁矿、白云石和方解石, 这表明铁碳酸盐受硫化作用的影响, Fe 析出生成黄铁矿。同时, 黄铁矿与金红石的紧密共生暗示黄铁矿可能由铁钛氧化物还原形成。铬云母、方解石、钠长石、金红石及黄铁矿等硫化物与成矿关系密切。

6 蚀变带物质组分迁移特征

本文分别选取铍厂沟金矿床细碧岩矿带 8 号矿体 1150 中段的绿泥赤铁矿化带、绢云碳酸盐化带及黄铁绢英岩化带样品、1130 中段的绿泥赤铁矿化带及黄铁绢英岩化带样品及 1110 中段的绢云碳酸盐化

带及黄铁绢英岩化带的样品和较远距离弱蚀变的细碧岩进行了物质成分和组分分析(表 4)。并运用 Grant^[36]的计算方法来确定各蚀变带物质组分的相对迁移量:

$$\Delta C = (C_i^F/C_i^A)(C^A - C^F)$$

式中: ΔC 为蚀变岩石相对于未蚀变岩石某组分迁移量; C_i^A 和 C_i^F 分别为蚀变岩石和未蚀变岩石不活泼组分含量; C^A 和 C^F 分别为蚀变岩石与未蚀变岩石某组分含量值。在计算出组分的相对迁移量的基础

上, 再采用 Guo *et al.*^[37]提出的标准化方法对不同蚀变带的组分迁移特征进行等质量标准化图解。

本文对各蚀变带岩石全岩分析数据进行综合整理和分析, 然后再进行逐个对比, 发现 Al、Ti 比值相对稳定, 具有不活泼成分的性质。前人研究也发现, Al、Ti 及 Zr 在产于花岗质岩石、基性超基性火山岩的脉状矿床围岩蚀变中是不活泼的^[38-41]。因此, 我们选择 Al_2O_3 作为不活泼组分, 选择细碧岩作为弱蚀变端元, 得出的等质量标准化图解见图 7。

表 4 铍厂沟金矿蚀变岩石主元素(%)和微量元素($\mu\text{g/g}$)含量测试结果
Table 4 Whole rock geochemistry data for altered rocks of the Huachanggou gold deposit

采样位置	1150 中段		8 号 1150 中段		8 号 1130 中段		8 号 1110 中段	
统一编号	a	b	c	d	e	f	g	h
样品数量	4	2	2	4	1	1	1	1
SiO ₂	49.52	49.88	46.70	37.95	49.16	36.08	41.86	37.69
TiO ₂	1.16	0.64	0.41	0.79	0.77	1.38	0.45	0.51
Al ₂ O ₃	14.30	13.79	12.90	15.11	11.32	13.50	14.85	14.47
Fe ₂ O ₃ ^T	13.70	9.30	9.40	10.0	11.00	15.00	8.31	7.91
MnO	0.23	0.20	0.20	0.22	0.23	0.24	0.17	0.20
MgO	5.20	4.37	4.02	4.46	4.37	6.73	4.37	4.56
CaO	4.13	6.63	6.03	8.67	5.81	6.40	9.57	11.36
Na ₂ O	4.75	3.71	4.11	2.85	5.35	3.29	2.53	2.26
K ₂ O	0.14	0.50	1.01	2.87	0.17	2.11	0.40	1.42
P ₂ O ₅	0.21	0.06	0.26	0.14	0.08	0.05	0.02	0.03
LOI	6.57	10.07	13.50	13.45	11.66	15.16	16.05	17.95
Total	99.93	99.18	98.92	96.59	99.93	99.91	98.67	98.49
Ba	77	88	130	261	38	244	60	420
Co	62.5	42.9	38.7	48.3	45.7	68.9	42.1	41.0
Cr	107	223	104	352	68	172	395	358
Cu	30.0	64.7	74.8	47.8	53.7	119.0	6.3	55.6
Ga	14.4	12.4	11.8	16.4	11.9	19.7	15.9	14.5
Nb	2.2	1.0	1.1	2.2	1.4	2.1	0.4	0.4
Ni	76.9	75.9	66.2	74.3	62.4	119.0	72.6	73.0
Pb	2.3	3.6	1.5	6.0	2.3	2.2	1.0	1.0
Rb	7.1	31.0	48.1	110.9	9.5	95.9	17.9	53.7
Sr	111.8	109.5	132.0	193.1	147.0	206.0	133.5	168.0
Sc	47.8	40.9	34.7	na	31.1	57.1	40.2	42.8
Th	0.3	0.2	0.2	0.2	0.17	0.2	na	na
U	0.4	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	na	na
V	238	160	127	196	163	251	203	201
Y	34.0	12.3	9.2	20.8	9.8	10.5	7.4	7.7
Zn	105	66	78	75	74	127	64	74
Zr	35	33	21	41	6	21	33	26
Sb	1.7	1.3	1.3	na	2.1	3.4	2.3	1.8

注: 主元素采用硼酸锂/偏硼酸锂熔融, X 射线荧光光谱法(XRF)分析, 精度优于 0.5%。微量元素和稀土元素采用多酸(四酸)消解, 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析, 相对标准偏差小于 5%。岩石地球化学成分分析在澳实分析检测(广州)有限公司完成。na-低于检出限; LOI-烧失量。a-细碧岩; b-绿泥赤铁矿化带; c-绢云碳酸盐化带; d-黄铁绢英岩化带; e-绿泥赤铁矿化带; f-黄铁绢英岩化带; g-绿泥赤铁矿化带; h-绢云碳酸盐化带。

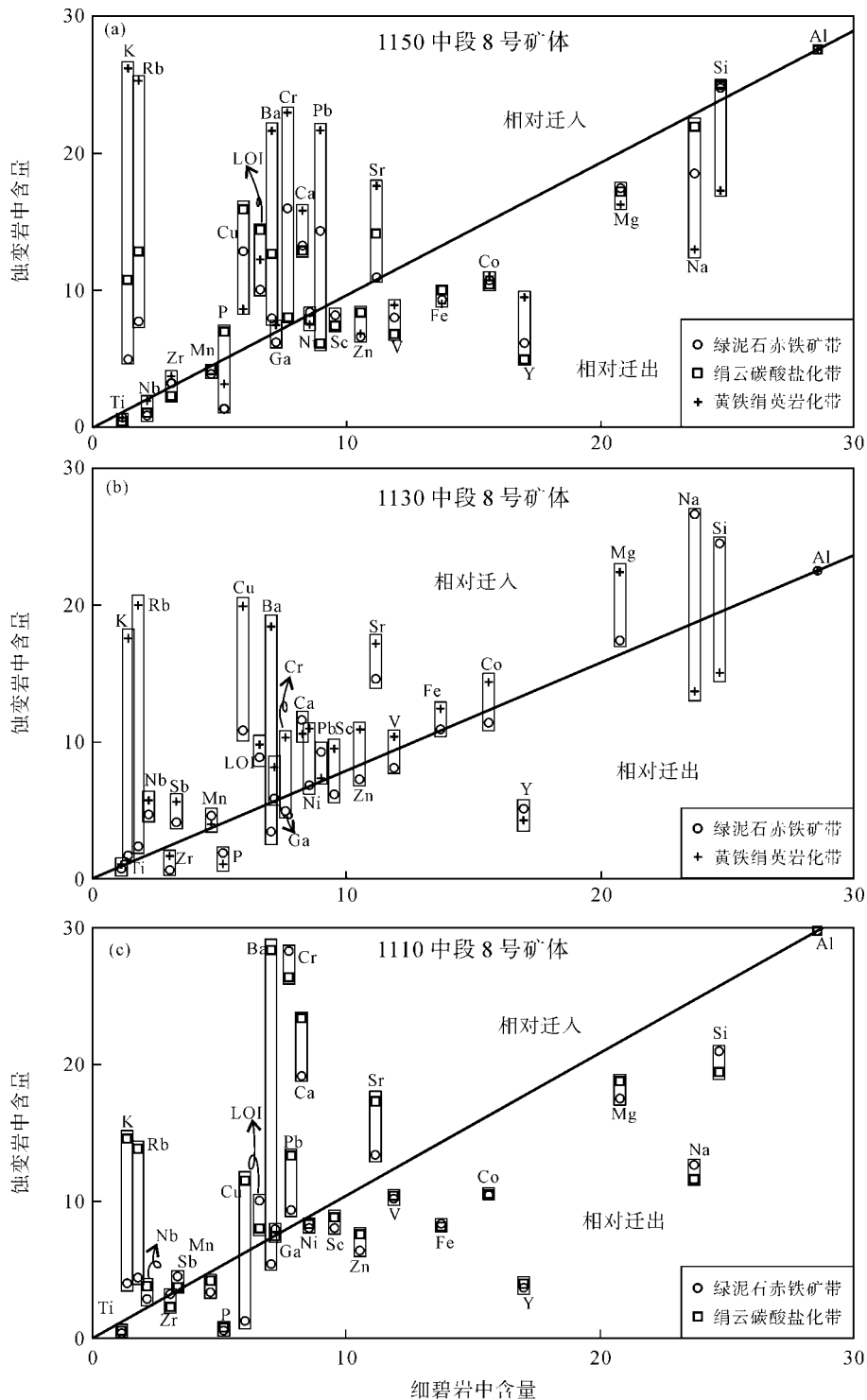


图7 铀厂沟金矿床蚀变带等质量标准化图解

Fig.7 Normalized isocon diagrams showing the mass transfers of the alteration zones in the Huachanggou gold deposit

该图解阐明各组分强蚀变带中主元素和微量元素较细碧岩的得失及各蚀变带的相对迁移情况；图中的较粗的黑线指示以 Al_2O_3 标准化的等质量线，斜线上方为迁入的元素，斜线下方为迁出的元素；等质量计算方法据文献[36]，标准化方法据文献[37]。投图中主元素为其氧化物质量分数(%)乘以比例系数(f)，微量元素为其质量分数($\mu\text{g/g}$)乘以比例系数(f)： $f(\text{Al}) = 2$, $f(\text{Mg}) = 4$, $f(\text{Ti}) = 1$, $f(\text{Na}) = 5$, $f(\text{K}) = 10$, $f(\text{P}) = 20$, $f(\text{Fe}) = 1$, $f(\text{Si}) = 0.5$, $f(\text{Ca}) = 2$, $f(\text{Mn}) = 20$, $f(\text{LOI}) = 1$, $f(\text{Zr}) = 0.1$, $f(\text{Rb}) = 0.25$, $f(\text{Cr}) = 0.07$, $f(\text{Y}) = 0.51$, $f(\text{Cu}) = 0.2$, $f(\text{Zn}) = 0.1$, $f(\text{Pb}) = 1$, $f(\text{Ga}) = 0.5$, $f(\text{Ni}) = 0.11$, $f(\text{Sb}) = 1$, $f(\text{Sc}) = 0.2$, $f(\text{V}) = 0.05$, $f(\text{Sr}) = 0.1$, $f(\text{Co}) = 0.25$, $f(\text{Ba}) = 0.09$, $f(\text{Nb}) = 1$ 。

a-细碧岩矿带 1150 中段 8 号矿体围岩蚀变元素迁移图。细碧岩、绿泥赤铁矿化带、绢云碳酸盐化带及黄铁绢英岩化带数据分别为表 1 中 a、b、c 及 d。
b-细碧岩矿带 1130 中段 8 号矿体围岩蚀变元素迁移图。细碧岩、绿泥赤铁矿化带及黄铁绢英岩化带数据分别为表 1 中 a、e 及 f。
c-细碧岩矿带 1110 中段 8 号矿体围岩蚀变元素迁移图。细碧岩、绿泥赤铁矿化带及绢云碳酸盐化带数据分别为表 1 中 a、g 及 h。

3个中段的蚀变岩石的组分迁移特征虽然有所不同(图7),但总体规律相似:CaO、K₂O、Ba、Rb、Sr、Cu、Pb、Nb、Cr和Sb等组分在各蚀变带中不同程度富集,而SiO₂、Fe₂O₃^T、MgO、Na₂O、Co和Y等组分发生不同程度的组分迁出,但不同蚀变带中元素的迁移幅度具有差异性。

黄铁绢英岩化带 该带内CaO、K₂O、Rb、Ba、Sr、Cu、Pb、Cr和Sb组分不同程度富集,而SiO₂、Na₂O和Y呈现不同程度的亏损(图7a、b)。SiO₂的亏损应该是由强烈的热液作用导致硅酸盐矿物发生交代淋滤,如阳起石被绿泥石和碳酸盐交代、绿泥石被碳酸盐交代和钠长石被绢云母交代等都会导致SiO₂的析出。CaO富集与碳酸盐化相关。K₂O富集而Na₂O亏损是因为富Na的钠长石被富K的绢云母交代所造成的,被淋滤出来的Na⁺在附近富集形成钠长石脉。Cr含量显著增高,其趋势与MgO、Ni不同而与K相似,表明其与云母的生成相关,形成富Cr云母,同时导致了矿石呈现翠绿色。F₂O₃^T及MgO在1150和1130中段表现出不同的迁移规律,在1150中段表现出亏损而在1130中段富集,可能表明了两中段蚀变带黄铁矿化的强度不同。Cu、Pb及Zn表现出不同程度的富集,这与镜下观察到黄铜矿、方铅矿及闪锌矿相吻合,同时也表明体系中较多的S加入。Y总体迁出,在1150中段黄铁绢英岩化带相对较弱,这与该蚀变带中和石英-钠长石脉中发现少量的磷钇矿一致。

绢云碳酸盐化带 该带中元素的迁移规律与黄铁绢英岩化带相类似,但是迁移的强度较弱,富集的组分包括CaO、K₂O、Rb、Ba、Sr、Cu、Pb及Cr,迁出的组分包括F₂O₃^T、MgO、Co及Y等;SiO₂表现出较弱的迁出(图7a和7c)。该蚀变带具有最高的烧失量,与镜下观察的强烈的碳酸盐化一致。

绿泥赤铁矿化带 该蚀变带与前两者相比,组分的迁移量较小,分布在等质量线附近(图7a、7b和7c)。少量的组分如K₂O、CaO、Cu、Cr和Pb等相对富集而F₂O₃^T、MgO、Co、Zn和Y等相对迁出。Na₂O及SiO₂除在1130中段表现为富集外,其他均表现为弱迁出,这种异常可能与蚀变带内出现的钠长石细脉相关。K₂O的迁入量并不大,表明绢云母化程度较弱,与观察的现象相符。CaO呈现富集与该带一定程度的碳酸盐化(铁白云石化)相关。

总体而言,K₂O、Rb、Ba、Ca及Sr等组分从蚀变带边缘向中心逐渐富集,而Na₂O、SiO₂和Y则逐

渐亏损。

7 讨论

7.1 矿物组合及元素迁移特征

铍厂沟金矿床细碧岩矿带围岩蚀变从剪切带中心向外蚀变强度减弱,水岩比值降低。蚀变侧向分带特征明显,从内向外依次可分为黄铁绢英岩化带-绢云碳酸盐化带-绿泥赤铁矿化带,与产于绿岩带的中温石英脉型金矿床相类似^[39-43]。蚀变带由外向内形成墨绿-紫红-黄绿-翠绿(浅黄色)褪色效应。这种褪色效应是由于Fe、Mg及Cr等元素不同的价态及矿物形式造成的。在弱蚀变细碧岩中,Fe、Mg主要以阳起石、绿帘石形式存在,造成岩石呈墨绿色;绿泥赤铁矿化带蚀变程度加深,Fe、Mg以绿泥石、赤铁矿及碳酸盐等形式存在,呈现紫红色,这由于Fe³⁺致色;绢云碳酸盐蚀变带中Fe、Mg主要以碳酸盐形式存在,岩石颜色退化成浅黄绿色到浅黄色;黄铁绢英岩化带变成浅绿色或翠绿色,这是由铬云母中的Cr²⁺造成的。对比铍厂沟金矿床弱蚀变的细碧岩和3个蚀变带矿物组合(图5)和物质成分迁移特征(图7a、7b和7c),可以看出以下特征。

(1) SiO₂在绿泥赤铁矿化带、绢云碳酸盐化带及黄铁绢英岩化带中总体表现为迁出(图7a、7b和7c),且蚀变越强烈,其迁出程度越高。这是由于在蚀变过程中硅酸盐被流体强烈交代SiO₂被淋滤造成的,如阳起石被绿泥石和碳酸盐交代、绿泥石被碳酸盐交代及钠长石被云母交代^[42]。其中钠长石被富钾的云母交代也导致了Na₂O被淋滤导致含量降低。析出的SiO₂及Na₂O随流体在剪切带中心或黄铁绢英岩化带中形成石英脉、钠长石脉。钠长石被富钾云母交代也导致K₂O、Rb及Cr含量增高。K₂O与Rb的迁移规律一致,表明Rb在矿物中类质同像替代K。

(2) 各蚀变带CaO含量均表现为迁入,这与各蚀变带普遍发生碳酸盐化相关。碳酸盐化包括铁白云石化、方解石化、菱铁矿化及白云石化。菱铁矿分布于绿泥赤铁矿化带及绢云碳酸盐化带,白云石仅出现在黄铁绢英岩化带或脉体(白云石-钠长石细脉)中。同样Ba、Sr等组分也呈迁入特征。

(3) Fe₂O₃^T与金矿化(黄铁矿化)的关系最为密切,在各蚀变带中表现出较为复杂的迁移形式:除了在1130中段中的黄铁矿化带中富集外,其他中段的各

蚀变带中均表现出不同程度的迁出。细碧岩为富铁岩石,从绿泥赤铁矿化带到黄铁绢英岩化带,富铁矿物如角闪石、阳起石被绿泥石-碳酸盐交代,铁白云石中铁含量降低,赤铁矿及菱铁矿在黄铁绢英岩化带消失,而黄铁矿含量增高,且均产在细碧岩中,这些证据均表明细碧岩矿带矿化过程中的 Fe 来自围岩。细碧岩矿带中 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 的迁出也暗示了灰岩矿带矿化过程中 Fe 的来源。在各蚀变带中 Fe 以不同的价态存在:在细碧岩及绿泥赤铁矿化带,Fe 主要以三价铁离子形式存在,表现为较为氧化的环境;而在绢云碳酸盐化带及黄铁绢英岩化带中,Fe 主要以二价铁离子存在于铁碳酸盐、黄铁矿中,表明蚀变带从外向内,还原性增强,氧逸度降低。 MgO 的迁移规律与 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 一致。

(4) Y 在各蚀变带中均表现为迁出,表明其在中温热液蚀变过程中较为活泼^[40-41]。

(5) 成矿元素如 Cu、Pb、Zn 及 Ni 等元素在各蚀变带中以迁入为主。

黄铁绢英岩化带、绢云碳酸盐化带及绿泥赤铁矿化带是叠加在区域变质作用之上的热液活动作用的结果。各蚀变带内矿物组合稳定,彼此差别明显。本文虽未测各蚀变带中金的迁移特征,但是结合矿区详查,矿区的蚀变分带与金矿化程度具有良好的对应关系,其中黄铁绢英岩化带中金矿化最强,形成工业矿体。

7.2 金的迁移及沉淀机制

铔厂沟金矿床细碧岩矿带的成矿流体早、中、晚期均是低盐度、富 CO_2 的热水溶液,并从早期到晚期 CO_2 含量逐渐降低^[8-9]。中期(主成矿阶段)温度为 240~320 °C,捕获压力变化于 123~267 MPa 之间,存在沸腾包裹体群,表明中期压力体系在静岩向静水压力转换,换算为成矿深度为 12~13 km 之间^[9],因此,铔厂沟金矿床是中温热液矿床。

金的迁移受流体的成分、氧化还原状态及温度的控制^[34]。实验证明, Au 在流体中主要以 Au-S 及 Au-Cl 络合物形式迁移。Au-S 络合物多稳定于弱酸性中低温热液中,并以 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 主导; Au-Cl 络合物多稳定于氧化、酸性、高温高盐度的热液中^[34,44-48]。矿床绿泥赤铁矿化带含大量赤铁矿,而黄铁绢英岩化带以黄铁矿、铁碳酸盐为主,表明 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 降低;根据周振菊^[49]提供的流体包裹体成分估算得出其 Eh 值为 0.10~0.12 V^[50], pH 值为 6.10~8.38^[50],表明

成矿流体具还原性、弱酸性到弱碱性特征,这与矿石中蚀变矿物以绢云母、钠长石及碳酸盐为主的特征一致^[46],结合含石英英流体包裹体中温低盐度的特点和气相成分中含 H_2S ^[8],表明金以 Au-S 络合物迁移,且可能是以 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 形式^[34,45-48]。

成矿热液的物理化学条件或其成分发生改变是导致金沉淀的主要原因,如温度降低、压力下降、流体沸腾/泡腾、流体混合或水岩反应,其中后三种是中温变质热液矿床中最为常见的机制^[34,51,52]。不同的沉淀机制可以通过矿物组合、结构特征及与同成矿期硫化物的硫同位素特征进行限定^[34]。周振菊等^[8-9]根据流体包裹体的沸腾包裹体群认为金是通过不混溶或沸腾作用机制沉淀的。然而,在细碧岩矿带中黄铁矿集中在蚀变岩中,自然金主要以包体金或裂隙金形式进入黄铁矿,部分直接沉淀于围岩中,这些矿石特征表明水岩反应可能是导致细碧岩矿带中金沉淀中重要机制^[42,43,53,54]。细碧岩矿带原岩为含赤铁矿的强氧化性富铁岩石,从绢云碳酸盐化带到黄铁绢英岩化带,铁白云石含量及其 FeO/CaO 均降低、菱铁矿消失而黄铁矿、方解石含量增加,表明富 CO_2 、含 S 的成矿流体与富铁围岩反应,黄铁矿交代铁碳酸盐或其他富铁矿物,流体被氧化, pH 值升高, $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 络合物失稳而导致 Au 沉淀^[39,42,46]。

7.3 矿床成因类型

矿床地质,尤其是矿体产状、矿石矿物成分和结构,是区分矿床类型、研究矿床成因的根本性依据^[52,55,56]。本文所讨论的矿床地质特征包括构造、围岩类型及变质程度、蚀变矿物组合及蚀变分带、组分迁移、矿化类型,以及前人得出的流体包裹体特征等^[8],这些特征均与造山型金矿床一致^[31,52-54,57-60](表 3),主要判别依据如下:

(1) 矿床地处勉略缝合带以南,矿化对围岩的选择性较弱(细碧岩及灰岩均有分布),严格受控于近东西向的逆冲断层及韧性剪切带。矿体呈脉状、透镜状右行斜列于围岩中。矿石类型以蚀变岩型为主,含少量石英脉型。

(2) 矿区及其周围除了新元古代火山岩外未发现其他侵入岩及火山岩。流体包裹体研究表明成矿流体为富 CO_2 、中温低盐度的变质热液^[8,31,52,53]。

(3) 围岩蚀变主要有黄铁矿化、碳酸盐化、钠长石化及绢(铬)云母化。在细碧岩矿带蚀变细碧岩体

表 5 铍厂沟金矿床细碧岩矿带矿床特征与造山型、卡林型金矿床特征对比

Table 5 Geological characteristics comparison between main ore zone of the Huachanggou gold deposit with orogenic and Carlin gold deposits

对比项目	造山型金矿 ⁽¹⁾	卡林型金矿 ⁽²⁾	细碧岩矿带	备注
构造背景	造山带	弧后伸展区或造山带	造山带	兼二
赋矿地质体	变质地质体	沉积地质体	变质地质体	造山型
岩性控制	任意岩性	钙质粉砂岩	蚀变细碧岩	造山型
控矿构造	韧性剪切带	层间或正断层	韧性剪切带	造山型
矿体形态、边界	脉状, 边界清楚	脉状, 似层状, 边界模糊	脉状, 边界模糊	兼二
蚀变或蚀变矿物组合	绿片岩相蚀变, 主要为硅化、绢云母化、钠长石化、碳酸盐化、绿泥石化、黄铁矿化	脱碳酸盐化、硅化、泥化、硫化物化	绢云母化、硅化、钠长石化、碳酸盐化、黄铁矿化、绿泥石化	造山型
蚀变分带	水平分带明显, 分带受围岩性质控制	黄铁绢英岩化带-硅化带-脱碳酸盐化带	黄铁绢英岩化带-绢云碳酸盐化带-绿泥赤铁矿化带	造山型
矿石类型	石英脉型, 蚀变岩型	蚀变岩型(沉积岩)	蚀变岩型、石英脉型	造山型
矿石矿物	黄铁矿为主	黄铁矿、毒砂等	黄铁矿	造山型
矿化元素组合	Au-Ag±(As, Sb, Te, W, Mo, Bi, B)	Au-As-Sb-Hg	Au±(Ag, As)	造山型
自然金粒度及赋存状态	较粗, 包体金、裂隙金、晶隙金, 可见明金	不可见金, 亚微粒包体物或固溶体	包体金、裂隙金, 可见明金	造山型
流体特征	低盐度、低密度含碳水溶液, 含 CO ₂ ± CH ₄ ± N ₂ ± H ₂ S	低盐度、低密度的水溶液	低盐度含碳的水溶液, 含 CO ₂ ± CH ₄ ± H ₂ S ⁽³⁾	造山型
盐度	常为 3%~12% NaCl	< 8% NaCl	0.4%~11.9% NaCl ⁽³⁾	造山型
初始流体性质	变质流体+大气降水	建造水或大气降水	变质流体+大气降水 ⁽³⁾	造山型
主成矿温度	200~500 °C	160~250 °C	240~320 °C ⁽³⁾	造山型
成矿压力	50~400 MPa	25~65 MPa	123~245 MPa ⁽³⁾	造山型
流体沸腾	有	无	有 ⁽³⁾	造山型

注: (1) 主要参考文献[57, 60]; (2) 主要参考文献[57, 61, 62]; (3) 参考文献[8]。

中国岩蚀变分带明显, 从剪切带中心向外可以分为黄铁绢英岩化带-绢云碳酸盐化带-绿泥赤铁矿化带, 与典型的造山型金矿床一致^[31,39-43,57,58]。

8 结 论

(1) 铍厂沟金矿床细碧岩矿带围岩蚀变从剪切带中心向外依次为黄铁绢英岩化带、绢云碳酸盐化带、绿泥赤铁矿化带。

(2) 蚀变岩石物质组分迁移分析表明, SiO₂、Na₂O、MgO、Fe₂O₃^T和 Y 迁出; K₂O、CaO、Ba、Rb、Sr、Cr、Cu、Pb 及挥发组分迁入, 迁入程度从绿泥石化带向黄铁绢英岩化带依次增高。

(3) 矿床地质特征、蚀变矿物组合及蚀变分带、组分迁移表明, 铍厂沟金矿床是属于造山型金矿床。

野外工作得到西北大学张复新教授的指导和铍厂沟金矿同行们的大力支持, 论文写作得到毛世东博士的帮助, 两位审稿人提出了宝贵的修改意见, 特致谢意!

参考文献(References):

- [1] 白忠. 陕西铍厂沟金矿床成因探讨[J]. 矿产与地质, 1996, 10(2): 108-113.
Bai Zhong. Genesis of the Huachanggou gold deposit in Shanxi Province [J]. Mineral Resour Geol, 1996, 10(2): 108-113 (in Chinese with English abstract).
- [2] 魏刚锋, 姜修道, 刘永华, 杜佩轩. 铍厂沟金矿床地质特征及控矿因素分析[J]. 矿产地质, 2000, 19(2): 138-146.
Wei Gang-feng, Jiang Xiu-dao, Liu Yong-hua, Du Pei-xuan. Geological characteristics and ore-controlling factors of the Huachanggou gold deposit [J]. Mineral Deposit, 2000, 19(2): 138-146 (in Chinese with English abstract).
- [3] 魏刚锋, 陈新跃, 辛红刚. 铍厂沟金矿床区域韧性剪切带特征[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(2): 179-186.
Wei Gang-feng, Chen Xin-yue, Xin Hong-gang. Characteristics of the regional ductile shear zones in Huachanggou gold deposit area in Lueyang, Shanxi [J]. Geotecton Metallogen, 2004, 28(2): 179-186 (in Chinese with English abstract).
- [4] 魏刚锋, 聂江涛, 辛红刚, 姜修道, 张振国, 袁速成. 铍厂沟金矿床北部控矿剪切带地质特征及金的富集规律[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(4): 38-44.
Wei Gang-feng, Nie Jiang-tao, Xin Hong-gang, Jiang Xiu-dao, Zhang Zhen-guo, Yuan Su-cheng. Geological characteristics

- and regularity of gold enrichment of north ore-controlling ductile shear zone in Huachanggou Gold Deposit [J]. *J Earth Sci Environ*, 2005, 27(4): 38–44 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张复新, 季军良, 龙灵利, 范春花. 南秦岭卡林型-似卡林型金矿床综合地质地球化学特征[J]. *地质评论*, 2001, 47(5): 492–499.
Zhang Fu-xin, Ji Jun-liang, Long Ling-li, Fan Chun-hua. Comparative features of Carlin-para-Carlin type gold deposits in the South Qinling and gold deposits in other areas [J]. *Geol Rev*, 2001, 47(5): 492–499 (in Chinese with English abstract).
- [6] 陈衍景, 张静, 张复新, Pirajno F, 李超. 西秦岭地区卡林-类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式[J]. *地质论评*, 2004, 50(2): 134–152.
Chen Yan-jing, Zhang Jing, Zhang Fu-xin, Pirajno F, Li Chao. Carlin and Carlin-like gold deposits in Western Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model [J]. *Geol Rev*, 2004, 50(2): 134–152 (in Chinese with English abstract).
- [7] 宗静婷. 陕西略阳铀厂沟金矿床地质与矿床类型[J]. *西北地质*, 2004, 37(1): 97–101.
Zong Jing-ting. Features of Huachanggou gold deposit and its type in Lueyang County, Shaanxi [J]. *Nothw Geol*, 2004, 37(1): 97–101 (in Chinese with English abstract).
- [8] 周振菊, 秦艳, 林振文, 王立新, 汪志强. 西秦岭铀厂沟金矿床流体包裹体特征研究及矿床成因[J]. *岩石学报*, 2011, 27(5): 1311–1326.
Zhou Zhen-ju, Qin Yan, Lin Zhen-wen, Wang Li-xin, Wang Zhi-qiang. Study of fluid inclusion characteristic and genetic type of the Huachanggou gold deposit, West Qinling Orogen [J]. *Acta Petrol Sin*, 2011, 27(5): 1311–1326 (in Chinese with English abstract).
- [9] Zhou Zhenju, Lin Zhenwen, Qin Yan. Geology, geochemistry and genesis of the Huachanggou gold deposit, western Qinling Orogen, central China [J]. *Geol J*, 2014, 49(4/5): 424–441.
- [10] 张国伟, 程顺友, 郭安林, 董云鹏, 赖绍聪, 姚安平. 秦岭-大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识——兼论中国大陆主体的拼合[J]. *地质通报*, 2004, 23(9/10): 846–853.
Zhang Guo-wei, Cheng Shun-you, Guo An-lin, Dong Yun-peng, Lai Shao-cong, Yao An-ping. Mianlue paleo-suture on the southern margin of the Central Orogenic System in Qinling-Dabie — With a discussion of the assembly of the main part of the continent of China [J]. *Geol Bulletin China*, 2004, 23(9/10): 846–853 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 郭安林, 孟庆任, 刘少锋, 程顺友, 姚安平, 张宗清, 裴先治, 李三忠. 秦岭-大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(12): 1122–1135.
Zhang Guo-wei, Dong Yunpeng, Lai Shaocong, Guo Anlin, Meng Qingren, Liu Shaofeng, Cheng Shunyou, Yao Anping, Zhang Zongqing, Pei Xianzhi, Li Sanzhong. Mianlue tectonic zone and Mianlue suture zone on southern margin of Qinling-Dabie orogenic belt [J]. *Sci Chin (D)*, 2003, 33(12): 1122–1135 (in Chinese).
- [12] Dong Y, Zhang G, Neubauer F, Liu X, Genser J, Hauzenberger C. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. *J Asian Earth Sci*, 2011, 41(3): 213–237.
- [13] 林振文, 秦艳, 周振菊, 岳素伟, 曾庆涛, 王立新. 南秦岭勉略带铀厂沟火山岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2013, 29(1): 83–94.
Lin Zhen-wen, Qin Yan, Zhou Zhen-ju, Yue Su-wei, Zeng Qing-tao, Wang Li-xin. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the volcanic rocks at Huachanggou area, Mianlue suture, South Qinling [J]. *Acta Petrol Sin*, 2013, 29(1): 83–94 (in Chinese with English abstract).
- [14] 李亚林, 李三忠, 张国伟. 秦岭勉略缝合带组成与古洋盆演化[J]. *中国地质*, 2002, 29(2): 129–134.
Li Ya-lin, Li San-zhong, Zhang Guo-wei. Composition of the Mianlue suture zone and its relation with evolution of the old ocean basin [J]. *Geol Chin*, 2002, 29(2): 131–136 (in Chinese with English abstract).
- [15] 陈衍景. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用[J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 854–865.
Chen Yan-jing. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling Orogen, Central China [J]. *Geol China*, 2010, 37(4): 854–865 (in Chinese with English abstract).
- [16] Li N, Chen Y J, Santosh M, Pirajno, F. Compositional polarity of Triassic granitoids in the Qinling Orogen, China: Implication for termination of the northernmost paleo-Tethys [J]. *Gondw Res*, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2013.09.017>.
- [17] 李曙光, 孙卫东, 张国伟, 陈家义, 杨永成. 南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩的年代学和地球化学——古生代洋盆及其闭合时代的证据[J]. *中国科学(D 辑)*, 1996, 39(3): 300–310.
Li Shuguang, Sun Weidong, Zhang Guo-wei, Chen Jiayi, Yang Yongcheng. Chronology and geochemistry of metavolcanic rocks from Heigouxia Valley in Mianlue tectonic zone, South Qinling: Evidence for a Paleozoic oceanic basin and its close time [J]. *Sci Chin (D)*, 1996, 39(3): 300–310 (in Chinese).
- [18] 李亚林, 张国伟, 王成善, 李三忠. 秦岭勉略缝合带两期韧性剪切变形及其动力学意义[J]. *成都理工学院学报*, 2001, 28(1): 28–33.
Li Ya-lin, Zhang Guo-wei, Wang Cheng-shan, Li San-zhong. The characteristics and implications of ductile shear deformations in Mianxian-Lueyang suture zone, Qinling Orogenic Belt [J]. *J Chengdu Univ Technol*, 2001, 28(1): 28–33 (in Chinese with English abstract).
- [19] 魏春景. 陕甘川交界区碧口群的绿帘石及其岩石学意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 1993, 12(4): 332–340.
Wei Chun-jing. Epidotes from Bikou Group in the Shanxi-Gansu-Sichuan border area and their petrological significance [J]. *Acta Petrol Mineral*, 1993, 12(4): 332–340 (in Chinese with English abstract).
- [20] 张国伟, 张宗清. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义[J]. *岩石学报*, 1995, 11(2): 101–114.

- Zhang Guo-wei, Zhang Zong-qing, Dong Yun-peng. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling Orogen: Implications for the tectonic evolution [J]. *Acta Petrol Sin*, 1995, 11(2): 101-114 (in Chinese with English abstract).
- [21] 杨永成, 陈家义, 李荣社, 霍向光. 陕西勉略蛇绿构造混杂带组成及演化[J]. *陕西地质*, 1996, 14(2): 1-12.
Yang Yong-cheng, Chen Jia-yi, Li Rong-she, Huo Xiang-guang. Compositions and evolution of the chaotic juncture of ophiolitic structures in Mianxie-Lueyang area, Shaanxi [J]. *Geol Shaanxi*, 1996, 14(2): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- [22] 孟庆任, 张国伟, 于在平, 梅志超. 秦岭南缘晚古生代裂谷-有限洋盆沉积作用及构造演化[J]. *中国科学(D 辑)*, 1996, 26(增刊): 28-33.
Meng Qingren, Zhang Guowei, Yu Zaiping, Mei Zhichao. Late Paleozoic sedimentation and tectonics of rift and limited ocean basin at the southern margin of the Qinling [J]. *Sci Chin (D)*, 1996, 26(S1): 28-33 (in Chinese).
- [23] 杜远生, 盛吉虎, 冯庆来, 顾松竹. 南秦岭勉略地区“三河口群”的解体及地质意义[J]. *地层学杂志*, 1998, 22(3): 170-175.
Du Yuan-sheng, Sheng Ji-hu, Feng Qing-lai, Gu Song-zhu. Disintegration of the “Sanhekou Group” in the Mianxian-Lueyang area, south Qinling and its geological significance [J]. *J Stratigr*, 1998, 22(3): 170-175 (in Chinese with English abstract).
- [24] 张宗清, 唐索寒, 张国伟, 杨永成, 王进辉. 勉县-略阳蛇绿混杂岩带镁铁质-安山质火山岩块年龄和该带构造演化的复杂性[J]. *地质学报*, 2005, 79(4): 531-539.
Zhang Zong-qing, Tang Suo-han, Zhang Guo-wei, Yang Yong-cheng, Wang Jin-hui. Ages of metamorphic mafic-andesitic volcanic rocks blocks and tectonic evolution complexity of Mianxian-Lueyang ophiolitic melange belt [J]. *Acta Geol Sin*, 2005, 79(4): 531-539 (in Chinese with English abstract).
- [25] 闫全人, 王宗起, 闫臻, 向忠金, 陈隽璐, 王涛. 秦岭勉略构造混杂带康县-勉县段蛇绿岩块-铁镁质岩块的 SHRIMP 年代及其意义[J]. *地质评论*, 53(6): 755-764.
Yan Quan-ren, Wang Zong-qi, Yan Zhen, Xiang Zhong-jin, Chen Juan-lu, Wang Tao. SHRIMP analyses for ophiolitic-mafic blocks in the Kangxian-Mianxian section of the Mianxian-Lueyang: Their geological implications [J]. *Geol Rev*, 2007, 53(6): 755-764 (in Chinese with English abstract).
- [26] 李曙光, 侯振辉, 杨永成, 孙卫东, 张国伟, 李秋立. 南秦岭勉略构造带三岔子古岩浆弧的地球化学特征及形成时代[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(12): 1163-1173.
Li Shuguang, Hou Zhenhui, Yang Yongcheng, Sun Weidong, Zhang Guowei, Li Qiuli. Geochemical features and forming age of the Sanchazi palaeo magma-arc in the Mian-Lue tectonic zone, South Qinling [J]. *Sci Chin (D)*, 2003, 33(12): 1163-1173 (in Chinese).
- [27] 赖绍聪, 张国伟, 杨永成, 陈家义. 南秦岭勉县-略阳结合带变质火山岩岩石地球化学特征[J]. *岩石学报*, 1997, 13(4): 563-573.
Lai Shao-cong, Zhang Guo-wei, Yang Yong-cheng, Chen Jia-yi. Petrology and geochemistry features of the metamorphic volcanic rocks in Mianxian-Lueyang suture zone, South Qinling [J]. *Acta Petrol Sin*, 1997, 13(4): 563-573 (in Chinese with English abstract).
- [28] 赖绍聪, 张国伟, 杨永成, 陈家义. 南秦岭勉县-略阳结合带蛇绿岩与岛弧火山岩地球化学及其大地构造意义[J]. *地球化学*, 1998, 27(3): 283-293.
Lai Shao-cong, Zhang Guo-wei, Yang Yong-cheng, Chen Jia-yi. Geochemistry of the ophiolite and island arc volcanic rock in the Mianxian-Lueyang suture zone, Southern Qinling and their tectonic significances [J]. *Geochimica*, 1998, 27(3): 283-293 (in Chinese with English abstract).
- [29] 赖绍聪, 张国伟, 裴先治, 杨海峰. 南秦岭康县-琵琶寺-南坪构造混杂带蛇绿岩与洋岛火山岩地球化学及其大地构造意义[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(1): 10-19.
Lai Shaocong, Zhang Guowei, Pei Xianzhi, Yang Haifeng. Geochemistry of the ophiolite and oceanic island volcanic rock in the Kangxian-Pipasi-Nanping tectonic melange zone, Southern Qinling and their tectonic significance [J]. *Sci Chin (D)*, 2003, 33(1): 10-19 (in Chinese).
- [30] 孙卫东, 李曙光, Chen Y D, 李育敬. 南秦岭花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地球化学*, 2000, 29(3): 209-216.
Sun Wei-dong, Li Shu-guang, Chen Y D, Li Yu-jing. Zircon U-Pb dating of granitoids from South Qinling, Central China and their geological significance [J]. *Geochimica*, 2000, 31(3): 222-229 (in Chinese with English abstract).
- [31] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre M M, Hagemann S G, Robert F. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. *Ore Geol Rev*, 1998, 13(1): 7-27.
- [32] 杨荣兴. 再论细碧-角斑岩系及成因[J]. *矿产与地质*, 2000, 14(2): 109-113.
Yang Rong-xing. Spilite-keratophyre sequence and its genesis [J]. *Mineral Resour Geol*, 2000, 14(2): 109-113 (in Chinese with English abstract).
- [33] 宗静婷, 蔡平. 铼厂沟金矿床成矿期次划分[J]. *咸阳师范学院学报*, 2003, 18(6): 44-47.
Zong Jing-ting, Cai Ping. Identifying of metallizing phase of Huangchanggou Gold Deposit [J]. *J Xianyang Teach Coll*, 2003, 18(6): 44-47 (in Chinese with English abstract).
- [34] Robb L. *Introduction to Ore Forming Processes* [M]. Oxford: Blackwell Science, 2005: 1-373.
- [35] Phillips G N, Brown I J. Host rock and fluid control on carbonate assemblages in the Golden Mile dolerite, Kalgoorlie gold deposit, Australia [J]. *Can Mineral*, 1987, 25(2): 265-273.
- [36] Grant J A. The isocon diagram: A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration [J]. *Econ Geol*, 1986, 81(8): 1976-1982.
- [37] Guo S, Ye K, Chen Y, Liu J B. A normalization solution to mass transfer illustration of multiple progressively altered samples using the ISOCON diagram [J]. *Econ Geol*, 2009,

- 104(6): 881–886.
- [38] Kreuzer O P. Textures, paragenesis and wall-rock alteration of lode-gold deposits in the Charters Towers district, north Queensland: implications for the conditions of ore formation [J]. *Mineral Deposit*, 2006, 40(6/7): 639–663.
- [39] Diné E, Fowler A D, Ayer J, Still A, Tylee K, Barr E. Litho-geochemical and stratigraphic controls on gold mineralization within the metavolcanic rocks of the Hoyle Pond Mine, Timmins, Ontario [J]. *Econ Geol*, 2008, 103(6): 1341–1363.
- [40] Eilu P, Mikucki E J. Alteration and primary geochemical dispersion associated with the Bulletin lode-gold deposit, Wiluna, Western Australia [J]. *J Geochem Explor*, 1998, 63(2): 73–103.
- [41] Eilu P, Mikucki E J, Dugdale A L. Alteration zoning and primary geochemical dispersion at the Bronzewing lode-gold deposit, Western Australia [J]. *Mineral Deposit*, 2001, 36(1): 13–31.
- [42] Phillips G N. Geology and alteration in the Golden Mile, Kalgoorlie [J]. *Econ Geol*, 1986, 81(4): 779–808.
- [43] Neall F B, Phillips G N. Fluid-wall rock interaction in an Archean hydrothermal gold deposit: A thermodynamic model for the Hunt Mine, Kambalda [J]. *Econ Geol*, 1987, 82(7): 1679–1694.
- [44] 陈华勇, 陈衍景, 倪培, 张莉, 张增杰. 新疆萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体成分、矿床成因和成矿预测[J]. *岩石学报*, 2007, 23(9): 2189–2197.
Chen Hua-yong, Chen Yan-jing, Ni Pei, Zhang Li, Zhang Zeng-jie. Chemical composition of fluid inclusions of the Sawayardun gold deposit, Xinjiang: Implication for ore genesis and predication [J]. *Acta Petrol Sin*, 2007, 23(9): 2189–2197 (in Chinese with English abstract).
- [45] 张生, 刘玉山. 金溶解度实验研究及地质意义[J]. *地球化学*, 1995, 24(增刊): 168–176.
Zhang Sheng, Liu Yu-shan. Experimental study of gold solubility and its geological significance [J]. *Geochimica*, 1995, 24(Suppl): 168–176 (in Chinese with English abstract).
- [46] Mikucki E J. Hydrothermal transport and depositional processes in Archean lode-gold systems: A review [J]. *Ore Geol Rev*, 1998, 13(1): 307–321.
- [47] Shenberger D, Barnes H. Solubility of gold in aqueous sulfide solutions from 150 to 350 [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53(2): 269–278.
- [48] Benning L G, Seward T M. Hydrosulphide complexing of Au(I) in hydrothermal solutions from 150–400 and 500–1500 bar [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60(11): 1849–1871.
- [49] 周振菊. 南秦岭铍厂沟与小秦岭文峪金矿对比研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2012.
Zhou Zhen-ju. Comparative study of the Huachangou gold deposit in southern Qinling and the Wenyu gold deposit in Xiaolinling terrane [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [50] Helgeson H C, Kirkham D H. Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressures and temperatures: II. Debye-Huckel parameters for activity coefficients and relative partial molal properties [J]. *Am J Sci*, 1974, 274(10): 1199–1261.
- [51] Hagemann S G, Cassidy K F. Archean orogenic lode gold deposits [J]. *Rev Econ Geol*, 2000, 13: 9–68.
- [52] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 2007, 23(9): 2082–2108.
Chen Yan-jing, Ni Pei, Fan Hong-rui, Pirajno F, Lai Yong, Su Wen-chao, Zhang Hui. Diagnostic fluid inclusions of different types of hydrothermal gold deposits [J]. *Acta Petrol Sin*, 2007, 23(9): 2082–2108 (in Chinese with English abstract).
- [53] Goldfarb R J, Baker T, Dube B, Groves D I, Hart C J R, Gosselin P. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes [J]. *Econ Geol*, 2005, 100th Anniv Vol: 407–450.
- [54] Cox S F, Ruming K. The St Ives mesothermal gold system, Western Australia — A case of golden aftershocks? [J]. *J Struct Geol*, 2004, 26(6): 1109–1125.
- [55] 胡受奚. 交代蚀变岩石学及其找矿意义[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1–264.
Hu Shou-xi. *Petrology of Metasomatic Rocks and Implications for Ore Exploration* [M]. Beijing: Science Press, 2002: 1–264 (in Chinese).
- [56] 陈衍景, 富士谷. 豫西金矿成矿规律[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 1–234.
Chen Yan-jing, Fu Shi-gu. *Gold Mineralization in West Henan* [M]. Beijing: Seismological Press, 1992: 1–234 (in Chinese with English abstract).
- [57] Kerrich R, Goldfarb R, Groves D I, Garwin S, Jia Yiefei. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces [J]. *Sci Chin (D)*, 2000, 43(Suppl): 1–68.
- [58] 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. *中国地质*, 2006, 33(6): 1181–1196.
Chen Yan-jing. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential [J]. *Geol Chin*, 2006, 33(6): 1181–1196 (in Chinese with English abstract).
- [59] Mernagh T P, Bastrakov E N, Zaw K, Wygralak A S, Wybom L. Comparison of fluid inclusion data and mineralization processes for Australian orogenic gold and intrusion [J]. *Acta Petrol Sin*, 2007, 23(1): 21–32.
- [60] Goldfarb R J, Taylor R D, Collins G S, Goryachev N A, Orlandini O F. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia [J]. *Gondw Res*, 2014, 25(1): 48–102.
- [61] Cline J S, Hofstra A A. Ore-fluid evolution at the Getchell Carlin-type gold deposit, Nevada, USA [J]. *Eur J Mineral*, 2000, 12(1): 195–212.
- [62] Hofstra A H, Cline J S. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits [J]. *Rev Econ Geol*, 2000, 13: 163–220.