甘肃阳山超大型卡林–类卡林型复合式金矿床特征

张复新[1]　侯俊富[1]　张存旺[1]　李　晶[2]　杨荣生[3]

(1.大陆动力学国家重点实验室(西北大学),西北大学地质学系,陕西 西安 710069;
2.中国科学院广东地球化学研究所,广东 广州 510640;3.北京大学地球与空间科学学院,北京 100087)

提要:阳山金矿于世纪之交勘查并扩大为超大微细浸染型金矿,矿床形成受地层、浅成花岗斑岩、韧–脆性剪切构造及热液活动的多种因素的叠加与改造控制,研究认为矿床具有卡林型和类卡林型两种矿化类型特点,卡林型矿化于韧性剪切早、早—中期阶段和晚期阶段,分别出现含砷黄铁矿–毒砂–次显微金–白云石–石英矿化组合及黄铁矿–辉锑矿–石英方解石矿化组合,及 Au–As–Sb–Hg 的成矿地球化学组合;类卡林型矿化出现在脆性中—晚期阶段,以黄铁矿–毒砂–自然金–碲铋矿–白云石–石英矿化(含黄铜–闪锌–方铅矿)组合为特征,及 Au–As–Cu–Pb–Zn–Te–Bi 成矿地球化学组合。阳山复合式金矿含矿地层中沉积成岩黄铁矿 $\delta^{34}S$ 为−24.6‰~−29.0‰,早期—早中期韧–脆性剪切金属硫化物矿化产物 $\delta^{34}S$ 值为 5.0‰~7.0‰, 中—晚期蚀变花岗斑岩中金属硫化物矿化产物 $\delta^{34}S$ 值为−2.9‰~−2.1‰,显示地层中生物硫、强变形造山带地壳硫、少量岩浆硫混入的多源特征。流体包裹体氢氧同位素与硫同位素近同步特征,成矿热液显示地下流体、强烈改造水和少量岩浆水的混合。

关　键　词:叠加与改造成矿作用;卡林–类卡林复合型金矿;阳山;西秦岭

中图分类号:P618.51　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000−3657(2007)06−1062−12

自 20 世纪 60 年代初,在美国西部内华达州首次发现卡林金矿,至 80 年代,在美国西部成功勘查千余千米,包含 20 多例超大–大型卡林金带, 金储量突破 2000 t 而轰动整个矿业界[1];70 年代末,在中国西南(贵州)和西北(陕西)先后发现板其、二台子两例卡林型金矿床[2],于 80 年代末,在中国扬子板块西南缘和西北缘发现一批卡林型金矿床,金矿储量千余吨,形成“西南、西北两个金三角”。世纪之交,武警黄金部队和西北有色地勘局分别在秦岭勘查成功阳山(300 t 以上)、八卦庙(100 t 以上)两个超大型金矿床,深入研究的同时提出类卡林型金矿概念,秦岭造山带存在经典卡林型金矿和类卡林型金矿床[3]。阳山金矿属于卡林–类卡林型复合式[4],八卦庙金矿属于类卡林型。勘查成果不但是金矿找矿上的重大突破,而且是对金矿理论的丰富。笔者针对阳山超大型–复合式金矿床的复合特征和成矿演化结构进行进一步剖析。

1　特殊的大地构造位置和优越的成矿地质背景

1.1　特殊的大地构造位置

阳山金矿床位于中国特殊的大地构造位置, 即扬子大陆—华北大陆—松潘—甘孜三大板块会聚–结合转化部位,该三大地块在会聚拼合的俯冲–碰撞造山过程中, 构成中国大陆的地质构造中心[5],该构造中心有东西向秦岭—祁连—昆仑中央造山系通过, 近南北向贺兰—川滇深大断裂带切割,构成来自三面板块的会聚、东西向造山带通过和南北向深大断裂带切割的纵横交叉的十字构造结,阳山超大金矿床产于中国大陆的地质构造中心构造结的交汇之处(图 2)。

1.2　优越的成矿地质背景

阳山金矿床所在中国大陆十字构造结中心的秦岭造山

收稿日期:2007−08−02;**改回日期**:2007−09−21

资助项目:国家自然科学基金项目(40572065)和国家重大基础研究规划项目(2006CB403502)共同资助。

作者简介:张复新,男,1945 年生,教授,博士生导师,主要从事矿床地质与地球化学研究;E−mail:zhangfux@nwu.edu.cn。

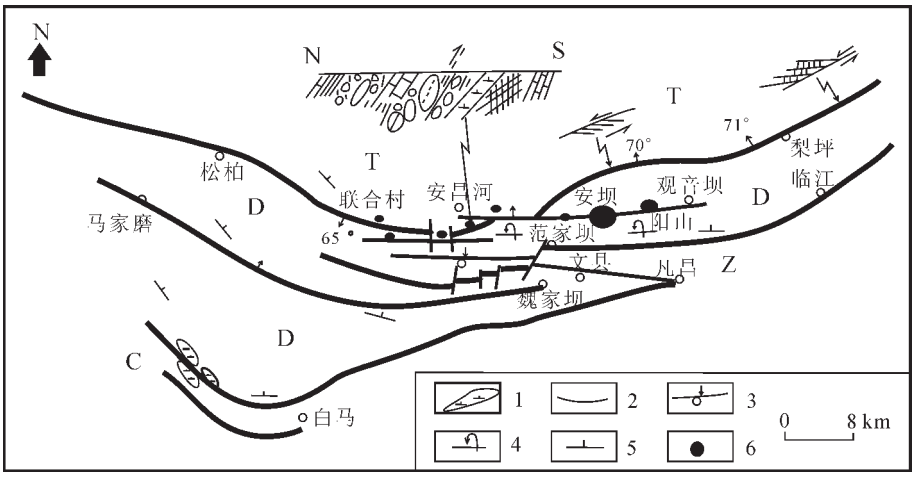


图 1 甘肃文县阳山金矿带区域地质简图(据杜子图等,1998 略有修改)

1—中基性岩体;2—区域断裂带;3—次级控矿断裂带;4—倒转地层;5—岩层产状;6—金矿床

Fig.1 Regional geological sketch map of the Yangshan gold belt, Wenxian County, Gansu (after Tu et al., 1998)

1–Intermediate–basic intrusion; 2–Regional fault zone; 3–Subsidiary ore–controlling fault zone; 4–Inverted strata; 5–attitude; 6–Gold deposit

带西部南侧陇南—文县地区,发育大陆边缘古生代断陷盆地海槽型类复理石巨厚沉积(∈—T)。早古生代沉积统一于扬子大陆边缘陆棚沉积,晚古生代由于勉—略缝合带的打开,使秦岭微地块独立出来,阳山地区特别紧邻南部勉–略缝合构造带,受到勉–略局限裂谷盆地的直接影响,发育中泥盆统三河口群(勉—略带)和产于的大陆造山系中的阳山成矿构造带,在南北大陆碰撞挤压拼合作用下,发育一套半深水沉积建造,成为金矿带的重要赋矿岩系。夹持在两条缝合构造带间(商—丹带、勉—略早期密集型弧形逆冲构造带[6]和东西向横切弧形构造带的控矿韧性剪切带(图 1)。在此构造机制作用下,宏观上,底部块状刚性地层体被逆冲剪切为不同尺度的构造透镜体–扁豆体,四周被薄互塑性变形地层围绕,微观薄互层中相对刚性与塑性层出现显微级的构造透镜体与塑性物质组成的片理化,构成该控矿构造带与扩容空间,成矿带中该刚性地层体与塑性变形体接触部位往往是矿体定位的空间。该地区沉积建造尤以泥盆系和三叠系为最,盆地较深水环境发育含矿性好的浊积岩、热水沉积岩等特殊岩性岩相。在随后与造山构造运动耦合过程中,发生较大规模成群成带的贵金属与贱金属矿床成矿作用响应,构成中国西部金–有色金属成矿区[7]。

本区重要的成矿背景和构造特殊与优越性在于:①处于中国大陆构造中心,由中国大陆不同构造系统集结复合而成;②经历长期复杂的地质构造演化:古大陆地块–大陆边缘增生→大陆边缘斜坡沉积→古特提斯分支裂陷叠加→地幔柱上拱、勉—略—康局限洋盆扩张→南秦岭形成相对独立地块→研究区深水、半深水沉积→南北大陆俯冲–碰撞与勉–略混杂岩带形成→大陆拼合统一及陆内挤压造山–韧性剪切构造发育→陆内拉张岩浆侵入→新生代基本定型;③矿带及超大型金矿床产于勉–略缝合带近北缘附近,勉—略上古生代的拉张裂谷活动制约和影响着赋存阳山超大金矿的巨厚的沉积容矿岩系的发育;④后造山期花岗岩类活动较频繁,参与了本区控矿构造,并与含矿沉积岩系共同组成金矿体;⑤后造山期韧–脆性剪切变形构造的叠加改造,成为地下流体活动与聚集的动力,致使含矿岩系中成矿物质被萃取、迁移与富集,最终形成超大复合式阳山金矿床。

2 矿区地质

2.1 阳山超大型金矿一般地质特征

阳山金矿自 1996 年发现,现已扩大为控矿构造带长 40 km,宽 1 km 的矿带,自东向西共由 6 个矿段:阳山、观音坝、高楼山、安坝、葛条湾、泥山矿段组成(图 2);共发现 49 条金矿脉,金矿储量超过 300 t,其中规模最大的 305#、314# 矿脉均位于安坝矿段 (图 2~3),安坝矿段 305# 单个矿体储量 56.133 t,矿石含金平均品位 7.06×10^{-6},314# 单个矿体储量 27.570 t;矿石含金平均品位 5.64×10^{-6},最高达 256×10^{-6} [8,9];研究确定[4],原生矿石金赋存呈两种形式:次显微金、显微金及肉眼可见明金,融有卡林型与类卡林型两种金矿类型的特征。次显微金多赋存于含砷黄铁矿及毒砂晶格缺陷之中[10],显微金及肉眼可见明金产出含硫化物石英细脉中的黄铁矿、石英晶粒边缘、粒间及晶粒内部包裹体中[11]。

2.2 矿区地层

矿区南部出露有元古宇碧口群碳酸盐岩、硅质岩、片岩、

千枚岩、超基性-基性岩及绿片岩等,属于勉—略混杂岩带部分。矿区内发育泥盆系三河口群,矿区周围有石炭系和二叠系、三叠系碳酸盐岩及碎屑岩出露, 侏罗系砂砾岩零星分布(图 2)。三河口群为阳山金矿床的主要容矿与含矿围岩,大致可分为 6 个岩性段:下部厚层块状微晶灰岩、泥板岩-微晶灰岩,中下部硅质岩-炭质泥板岩-泥灰岩,中上部薄互层泥板岩、泥灰岩-粉砂质板岩的薄互层组成,上部砂质板岩-粉砂岩-中细粒石英砂岩层。总的趋势来看,整个岩系表现出从化学沉积岩相,相变为化学沉积与细碎屑岩交互过渡,最终为细碎岩相沉积的一个较为完整的沉积旋回,反映出泥盆系中期本区海相沉积由深海-半深海-浅海-浅水陆源碎屑沉积的一种动荡的沉积环境的变化。深海-半深海沉积地层中普遍含有炭质和草莓状黄铁矿, 电子探针波谱定量分析含砷 0.1%~0.15%,由于金、砷具有相似的地球化学性质行为和炭质对成矿物质的吸附作用,地层中高丰度的金主要赋存于地层草莓黄铁矿和炭质之中。

2.3 矿床控矿构造

东西向展布的安昌河—观音坝断裂带为矿带的主控断裂(图 1~2),总体北倾,由一系列平行韧-脆性断层组构成,断层与地层产状近于一致或低角度交角。断裂带西段走向为 95~115°,南倾为主,倾角中等 40~50°,断裂带东段走向为 75° 左右,北倾为主,倾角较陡 50~60°。安昌河—观音坝断裂带沿东西走向上的不断变化形成的这种“麻花式”的断裂构造正是由于受到区域 NS 向不对称挤压应力及其派生的 NEE、NWW 剪应力作用造成的。矿体正好就位于断裂带扭转交汇部位。

本区构造变形具有韧-脆性递进变形序列的特征, 早期显示韧性,中期显示脆-韧性,晚期显示脆性破裂,各期又表现出不同的阶段性:早期韧性剪切阶段,含矿地层薄互层发生韧性变形,形成由 3 条向南凸出的弧形韧性断裂(松柏—黎坪、马家磨—魏家坝、白马—临江)带和早期褶皱及透入性片理(S_1),伴随的矿化蚀变为微细粒黄铁矿-毒砂-显微石英细脉。在脆-韧性剪切变形阶段,地层中塑性差的灰岩层在挤压剪切作用下形成穿刺塑性层的穿刺褶皱;而在早期褶皱翼部形成了一系列的脆-韧性断裂(如安昌河—观音坝断裂)和层间滑脱带、顺层断层、叠瓦式逆冲断层,并形成截切 S_1 的剪

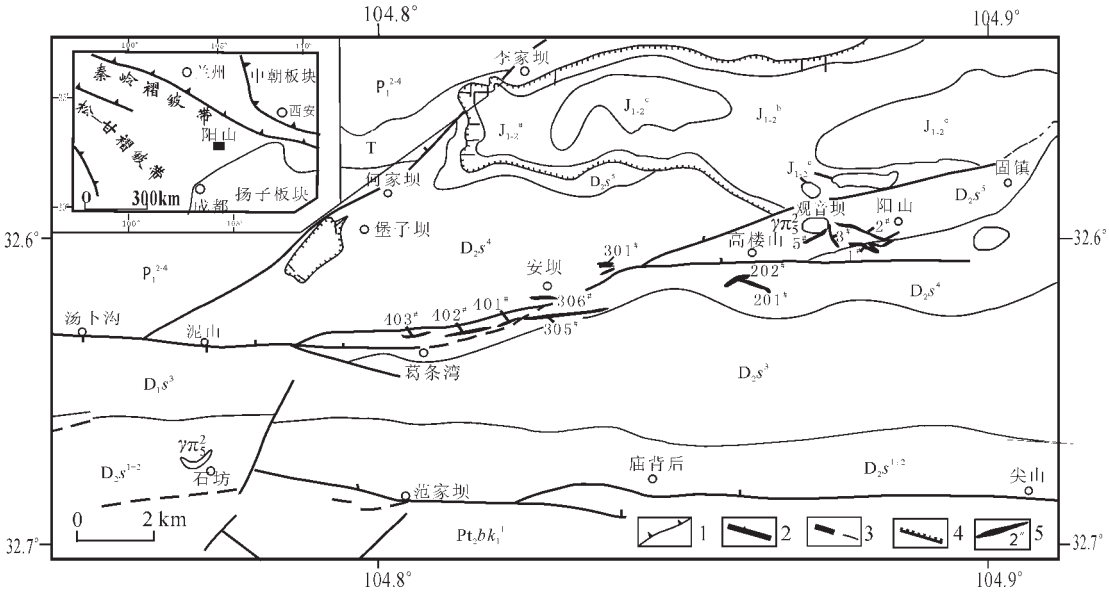


图 2 甘肃文县阳山金矿带地质简图

J_{1-2}^{a}—下—中侏罗统红色砾岩;J_{1-2}^{b}—下—中侏罗统泥灰岩、页岩;J_{1-2}^{c}—下—中侏罗统黄色砾岩;T—三叠系砂岩、板岩;P_1^{2-4}—下二叠统中部四段板岩、灰岩;D_2s^1—中泥盆统三河口群一岩段厚层灰岩;D_2s^2—中泥盆统三河口群二岩段泥板岩夹互灰岩;D_2s^3—中泥盆统三河口群三、四岩段硅质岩-泥灰岩-炭质泥板岩-粉砂泥板岩薄互层;D_2s^{4+5}—中泥盆统三河口群五、六岩段细砂岩、粉砂质板岩;$Pt_2bk_1^1$—中元古界碧口群下部一段灰岩、变质砂岩;$\gamma\pi_5^2$—燕山期花岗斑岩;1—俯冲带;2—断层;3—推测断层;4—地质界线与不整合界线;5—金矿化体及编号

Fig.2 Geological sketch map of the Yangshan gold belt, Wenxian County, Gansu

J_{1-2}^{a}- Lower-Middle Jurassic red conglomerate; J_{1-2}^{b}- Lower-Middle Jurassic marlstone and shale; J_{1-2}^{c}-Lower-Middle Jurassic yellow conglomerate; T-Triassic sandstone and slate; P_1^{2-4}-slate and limestone of the fourth member of the middle part of the Lower Permian; D_2s^1-thick-bedded limestone of the first member of the Middle Devonian Sanhekou Group; D_2s^2-argillite interbedded with limestone of the second member of the Middle Devonian Sanhekou Group; D_2s^3-alternating thin beds of siliceous rocks-marlstone-carbonaceous slate-silty argillite of the third and fourth members of the Middle Devonian Sanhekou Group; D_2s^{4+5}-fine sandstone and silty slate of the fifth and sixth members of the Middle Devonian Sanhekou Group; $Pt_2bk_1^1$-limestone and metasandstone of the first member of the lower part of the Mesoproterozoic Bikou Group; $\gamma\pi_5^2$-Yanshanian granite-porphyry; 1-Subduction zone; 2-Fault; 3-Inferred fault; 4-Geological boundary and unconformity; 5-Gold mineralization and number

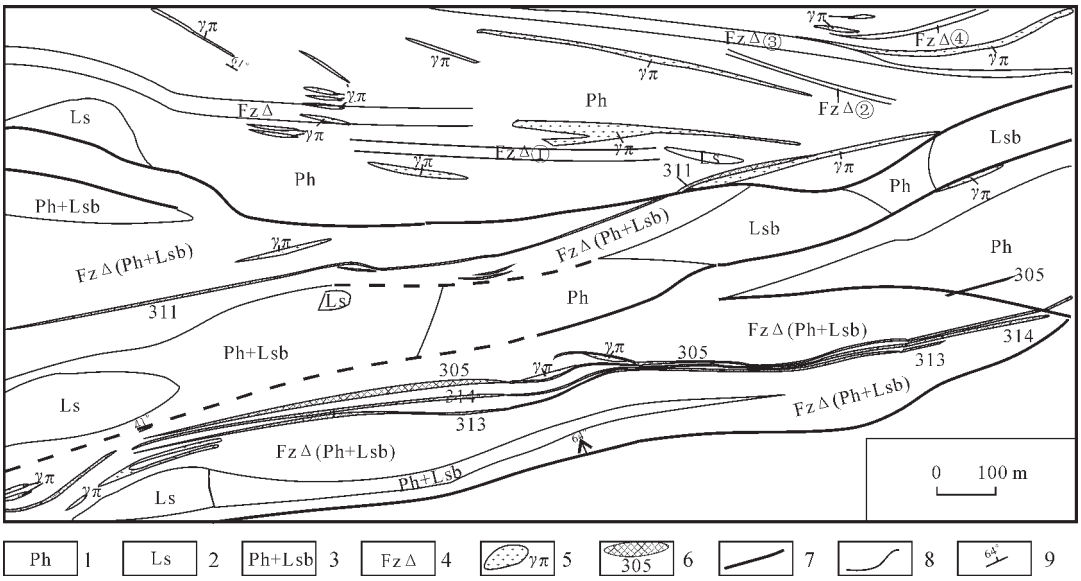


图 3　阳山金矿安坝—葛条湾矿段地质简图(据武警黄金部队三纵队资料简化)

1—绢云母千枚岩;2—灰岩;3—千枚岩夹板岩;4—蚀变岩;5—斜长花岗斑岩;6—金矿体及编号;7—断层;8—地质界线;9—产状

Fig.3　Geological sketch map of the Anba–Getiaowan ore segment, Yangshan gold deposit

1–Sericite phyllite;2–Limestone;3–Phyllite with slate;4–Altered rock;5–Plagiogranite porphyry;6–Gold orebody and its number;7–Fault;8–Geological boundary;9–Attitude

表 1　阳山矿区岩浆岩类型与特征

Table 1　Types and features of magmatic rocks in the Yangshan gold district

花岗浅成岩类型	斑　晶	基　质	结　构
黑云花岗细晶岩	缺少	黑云母、石英、斜长石	细晶花岗结构
黑云母花岗斑岩	石英、斜长石、黑云母	斜长石、黑云母	斑状结构
黑云母花岗斑岩	斜长石、黑云母	石英、斜长石、黑云母	斑状结构
斑状细粒黑云母花岗岩	斜长石、黑云母	石英、斜长石、黑云母	似斑状结构

切片理(S_2);在剪切应力作用下,塑性变形产生的揉皱地层被剪切成透镜体,地层中的刚性体也剪切成透镜体状,如灰岩、硅质岩、砂岩、斜长花岗斑岩透镜体,较弱的矿化蚀变花岗脉岩类均呈构造透镜体状、旋转岩块出现在泥板岩强烈片理化带中,组成本区控矿脆–韧性剪切带的典型构造形貌特征。在脆–韧性剪切变形晚期,产生了一系列的脆性断层,在断层两侧形成了复杂紧闭的小褶皱;在塑性层中产生了雁列式脉及截切 S_2 的剪切片理 S_3;在此变形期形成的透镜体内包含有早期透镜体;薄互层在早期形成的褶皱受脆–韧性剪切作用产生了尖棱褶皱和张节理;硅化石英进一步在剪切作用改造下,呈拉长状、石香肠、眼球状、扁豆体状半定向分布。晚期的脆性断裂在已有构造基础上使地层发生强烈变形产生破碎带,分布于控矿构造带上下盘附近。

2.4　岩浆岩

2.4.1　岩浆岩类型与特征

矿区多种类型的花岗斑岩稀土总量较低 $\Sigma REE=81.06\times10^{-6}$(3 件),轻、重稀土含量比值较大(图 4),轻稀土明显富集,$La/Yb\approx33>10$,$\delta Eu\approx0.22$,明显亏损 Eu,在球粒陨石标准化图解中呈右倾的、宽缓的"V"型分布曲线,而且该花岗岩中的 Al_2O_3 含量为 14.58%。这些特征初步认定该花岗斑岩为地壳重熔型浅成花岗岩类,是与沉积围岩的韧性剪切同步的同构造岩浆活动产物(Michael W.Ressel,2006)。主要鉴别依据:①与剪切围岩构造变形协调一致,在剪切构造带中花岗斑岩岩株、岩脉呈构造扁豆体–透镜体;②岩株、岩脉作为含矿岩系剪切构造带中的刚性体内部无构造变形,但普遍绢云母化–硅化–黄铁矿–毒砂矿化蚀变,是后期热液渗透的结果;③岩脉类型多样(表 1),侵入深度不等,与剪切带构造序列多期多阶段一致;④花岗斑岩与围岩接触带矿化蚀变较强,石英脉中残留岩脉中锆石副矿物;⑤剪切带和花岗斑岩均为大陆统一后,陆内造山挤压–拉张作用的产物。

2.4.2　岩浆岩与成矿关系

矿区花岗斑岩参与到控矿构造带中,属于控矿构造带中

的组成部分,被韧性剪切构造剪切为刚性透镜体,除了岩浆岩体本身普遍遭受到矿化蚀变(绢云母-硅化-黄铁矿-毒砂化),含金黄铁矿增生环带消失;岩脉含金矿化硫化物中包裹有碲铋矿;特别在花岗斑岩透镜体与片理化含炭质泥板岩-粉砂泥板岩-泥灰岩薄互层的构造接触带中,多充填交代含有明金的石英细脉。该纯石英脉中发现岩浆岩中自形晶锆石(图版Ⅰ-7),恰恰利用石英脉中锆石进行成岩成矿定年[8],表明硅化对岩脉交代的强烈程度,同时,矿化组分中混入岩浆岩成矿多种物质,表现出类卡林型金矿化特征。

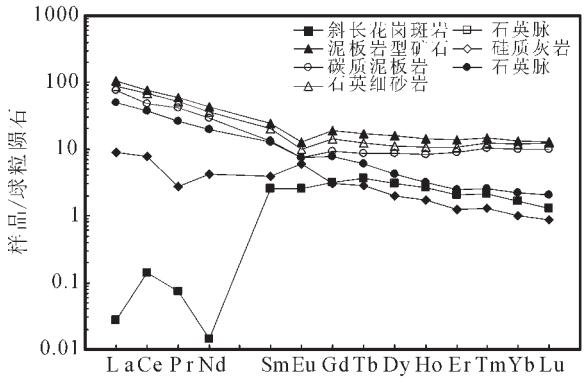


图 4 阳山金矿区容矿岩石及矿石矿物稀土配分模式[12]

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns for host rocks and ore minerals in the Yangshan gold deposit[12]

2.5 矿石矿物

矿化金属矿物主要由黄铁矿、毒砂、辉锑矿、自然金,及少量黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿和方铅矿组成。其中黄铁矿晶粒内部具有特征的增生环带(图版Ⅰ-3),由含砷较高的黄铁矿外缘及含砷较低的内核黄铁矿组成(表 2),增生环带黄铁矿与毒砂密切共生,构成金矿主要载金及含金矿物。矿区主要金属矿物含金性分析结果,毒砂中金含量最高,达 143.48×10^{-6},其次为黄铁矿,为 53.01×10^{-6},而辉锑矿中金含量最低,为 20.41×10^{-6},也反映了黄铁矿和毒砂为本区主要的载金矿物。金主要以次显微金形式赋存于含砷黄铁矿和毒砂中。

次显微金赋存于含砷黄铁矿和毒砂中,主要与金属硫化物中有过量的砷进入黄铁矿、毒砂晶格之中,纯净的毒砂含 As 为 46%,而矿石中毒砂高于标准 3.36%,黄铁矿更具富含 As,3.83%直至 10%以上,As 离子半径大于 S 离子半径[10],导致该金属硫化物晶格出现缺陷,显微构造成为次显微金赋存的空间。

2.6 矿石类型

按赋矿岩石和矿化蚀变矿物组合可划分为 6 种类型(表 3),由含炭细砂岩-泥板岩-灰岩-硅岩分别组合的薄互层型、斜长花岗斑岩型及石英脉型金矿石,均在脆-韧性剪切变形构造作用下伴随发生矿化蚀变。在变形的炭质纹层中多残

表 2 阳山金矿矿石中主要含金硫化物电子探针定量分析(%)

Table 2 Quantitative microprobe analysis of main gold-bearing sulfides in ores of the Yangshan gold deposit

样品号	矿物	S	Fe	As	Se	Ag	Co	Ni	Total
B20-1-1-1	毒砂	22.52	37.12	39.36	0.00	0.00	0.05	0.00	99.05
B20-1-1-2	环带黄铁矿	51.22	46.74	2.44	0.00	0.00	0.05	0.00	100.45
B20-1-2-1	内核黄铁矿	50.86	46.09	0.96	0.00	0.01	0.10	0.14	98.15
B20-1-2-2	环带黄铁矿	50.49	46.11	3.83	0.00	0.02	0.07	0.00	100.53
B-8-1	莓球黄铁矿	53.14	46.52	0.15	0.03	0.00	0.29	0.11	100.23
B-8-2	莓球黄铁矿	53.14	46.91	0.10	0.00	0.04	0.19	0.06	100.45

表 3 阳山金矿床矿石类型划分特征

Table 3 Types and features of ores in the Yangshan gold deposit

赋矿原岩	矿化矿物组合	产出部位	蚀变矿物组合
细砂岩-泥板岩薄互层型	毒砂-含砷黄铁矿-硅化石英浸染型含砷黄铁矿-硅化石英细脉浸染型	脆-韧性剪切带	次显微金、毒砂、含砷黄铁矿、浸染状硅化石英
灰岩-泥板岩薄互层型	毒砂-含砷黄铁矿-硅化石英细脉浸染型	脆-韧性剪切带	毒砂、含砷黄铁矿、浸染状硅化石英
硅岩-泥板岩薄互层型	毒砂-含砷黄铁矿-硅化石英细脉浸染型	脆-韧性剪切带	毒砂、含砷黄铁矿、浸染状硅化石英
斜长花岗斑岩型	毒砂-含砷黄铁矿-绢云母浸染型	脆-韧性剪切带	毒砂、含砷黄铁矿、绢云母、轻微硅化、次显微金
石英脉型	含金石英脉型	脆性断裂	含砷黄铁矿、磁黄铁矿、石英、辉锑矿、次显微金、可见明金
赋矿原岩与石英脉混合型	金-锑混合型	脆-韧性剪切带+脆性断裂	辉锑矿、毒砂、含砷黄铁矿、磁黄铁矿、石英、次显微金、可见明金

留莓球状黄铁矿(As 为 0.10%~0.15%)。

2.7 矿化期、矿化阶段、矿化矿物特征及矿物生成顺序

按照矿化蚀变与地层、构造变形、岩浆活动关系,可大致将阳山金矿成矿作用划分为,沉积预富集期,岩浆–构造–热液成矿期和表生氧化期。岩浆–构造–热液成矿期又可按矿物特征与组合划分为 6 个成矿阶段(图 5)。在含金丰度较高的

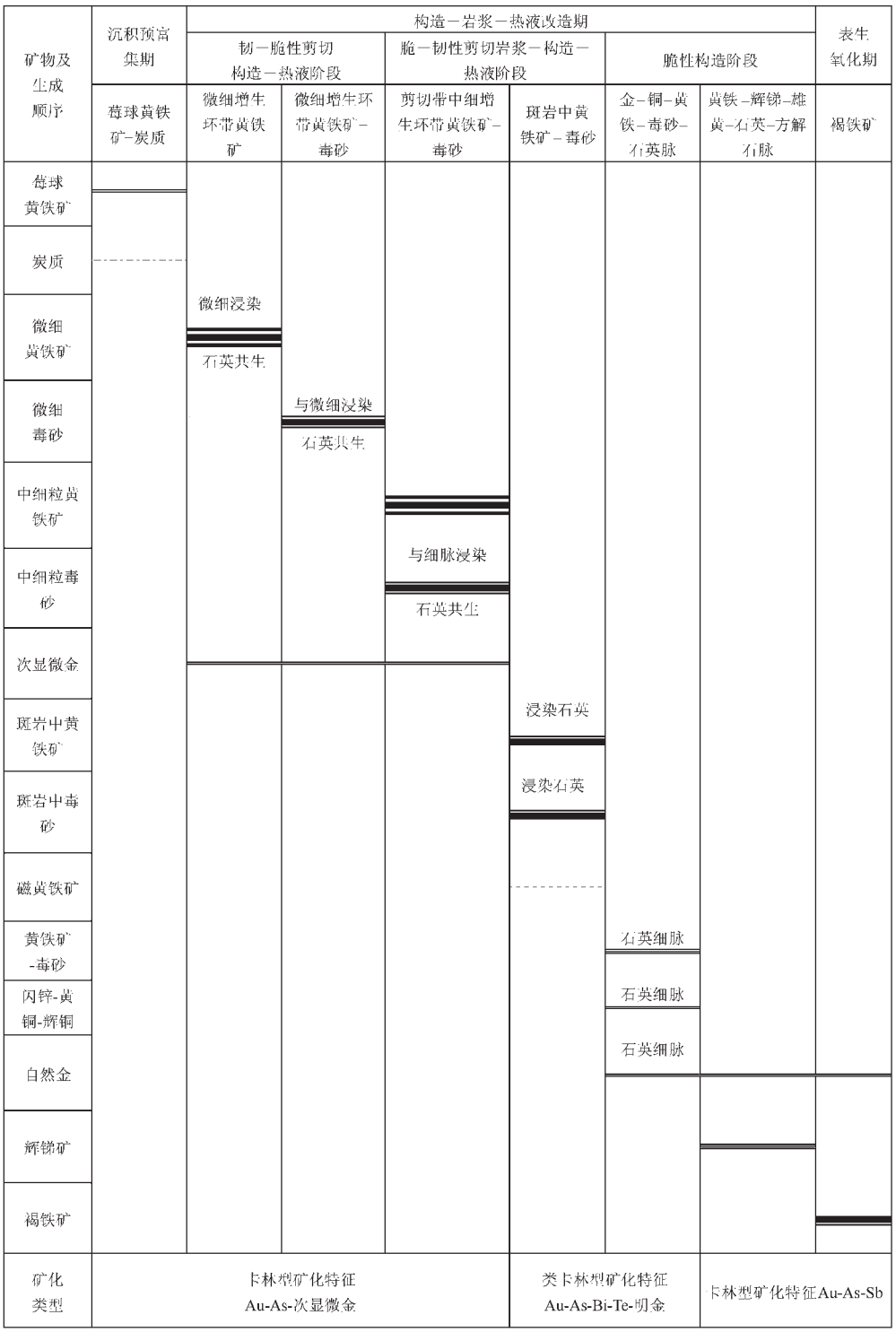
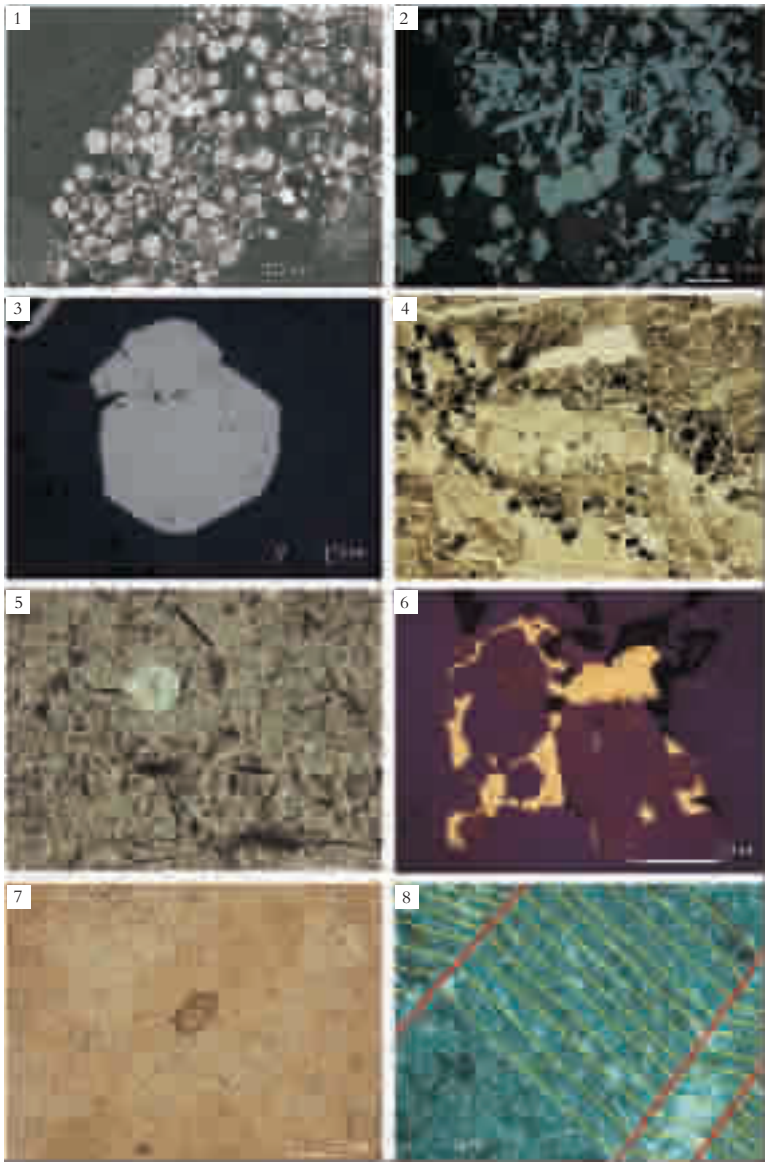


图 5　阳山金矿床成矿期、成矿阶段与矿物生成顺序

Fig.5　Phases and stages of mineralization and sequence of mineral formation

图版Ⅰ(Plate Ⅰ)



1—阳山地区三河口群炭质泥板岩-泥灰岩-硅质板岩薄互层中发育的黄铁矿莓球群,电子探针背散射图像,100μ;2—炭质粉砂-泥板岩薄互层型金矿石早期微细浸染状增生环带黄铁矿,核心为含砷低黄铁矿,环带为含砷高黄铁矿,细针柱状为毒砂,光片;3—炭质粉砂-泥板岩薄互层型金矿石早-中期稍粗粒增生环带黄铁矿,中心为反射率高、含砷低黄铁矿,增生环带为反射率低、含砷高黄铁矿,光片;4—硅板岩-泥板岩薄互层经脆韧性剪切构造变形,硅板岩层变形为构造扁豆-透镜体状(中偏左),同时发生含黄铁矿(自形粒状不透明者)-石英脉矿化蚀变,似造山带构造格局,薄片;5—蚀变花岗斑岩型金矿石中无增生环带含金黄铁矿和毒砂(针柱状),亮白色石英斑晶,薄片;6—葛条湾矿段含金石英脉中粒间填隙状自然金,光片;7—蚀变花岗斑岩被热液硅化石英同化残留锆石副矿物(中心高突起),薄片;8—硅板岩经韧性片理化变形出现膝褶,薄片

1-Pyrite framboids in the interbeds of silicalite, marl, carbonaceous slate of Sanhekou Group in Yangshan gold deposit, electron probe backscattering image, 100; 2-Early-stage micro-disseminated, overgrowth zoned pyrite in gold ore in interbeds of carbonaceous slit-argillites, arsenic-low pyrite in the core and arsenic hish pyrite in the overgrowths, fine needle-columnar mineral is arsenopyrite, polished section; 3-Early-to middle-stace slightly coarser overgrowth zoned pyrite in the gold ore in interbeds of carbonaceous silt-argillite; arsenic-low pyrite with high reflectivity in the core, arsenic-high pyrite with low reflectivity in the overgrowths, polished section; 4-After brittle-ductile shear deformation of alternating thin beds of siliceous slate and argillite, the former was deformed into tectoric pods or lenses (middle left), and meanwhile there occurred mineralization-alteration of pyrite(opaque euhedral grornular)-bearing veins, forming an orogenic bell-like tectonic framework, thin section; 5-zoned pyrite and arsenopyrite without overgrouths and bright withite quartz pherocrysts in altered granite porphyry-type gold ore; thin section; 6-Intergranular native gold in auriferous quartz veins, Getiaowan ore section, polished section; 7-Residual zircon in the altered granite porphyry assimilated by hydrothermal quartz(in the middle), thin section; 8-Kink fold in siliceous slate formed by ductile deformation, thin section

炭质泥板岩–泥灰岩–薄层灰岩–粉砂泥板岩–硅质岩的薄互层中，金等成矿物质主要赋存于莓球状黄铁矿中（图版Ⅰ–1），该黄铁矿含砷 0.10%~0.15%，部分被炭质吸附，形成金的沉积预富集；岩浆–构造–热液成矿早期，顺层侵入的花岗斑岩脉一同随含炭粉砂–泥–灰–硅质薄互沉积岩层，被韧性剪切构造片理化，伴随发育微细浸染状黄铁矿–毒砂–硅化，黄铁矿具增生环带（图版Ⅰ–3），φ=0.01~0.05 mm（图版Ⅰ–2），矿化强的矿体与矿化多产于厚层刚性剪切扁豆状岩块与环绕刚性岩块的塑性岩层接触带上（图版Ⅰ–4），黄铁矿晶粒增大具增生环带；岩浆–构造–热液成矿中期，细脉浸染状黄铁矿–毒砂–硅化多沿脆–韧性构造微裂隙充填–交代互层围岩中，稍晚阶段黄铁矿–毒砂–石英–绢云母矿化热液渗透稀疏浸染于蚀变花岗斑岩中（图版Ⅰ–5），含金黄铁矿、毒砂自形晶粒稍粗大 φ=0.05~0.4 mm，含砷增生环带消失；岩浆–构造–热液成矿晚期，发育黄铁矿化为主的多金属硫化物（黄铜矿–黝铜矿–闪锌矿–方铅矿）的矿化石英脉体沿脆性断裂充填，特别在围岩与剪切扁豆状蚀变花岗斑岩接触带上发育，该石英脉体中发现明金（图版Ⅰ–6）；矿化蚀变尾声，脆性构造成矿阶段发育黄铁矿–辉锑矿–石英–方解石网状裂隙脉。

3　微量元素和稀土元素与流体包裹体特征

3.1　微量元素组成特征

矿石中除 Au 外，As、Sb 含量明显偏高；此外，局部含一定量的 Ag、Hg、Pb、Zn、Cu、Bi、Te、Se 及炭质。Au 与上述微量元素相关分析，与 As、Sb、Hg、Ag 挥发性低温元素组合具正相关性。

据甘肃地质矿产局资料❶，陇南—文县—九寨地区区域微量元素 As(7.08)、Sb(2.27)、Au(1.1)、Ag(1.84)、Pb(1.67)、W(1.63)、Bi(2.27)、Mo(1.38)等浓集克拉克值较高或大于 1，表现出阳山金矿区域地球化学背景特征。武警黄金地质研究所对阳山金矿带岩、矿石（177 件）微量元素分析表明，As、Sb、Au、Ag、Pb、W、Bi、Mo 为本区高场区元素。阳山矿区高场元素对于不同岩、矿石平均含量有不同，Au、Ag 在泥板岩、泥砂岩、花岗斑岩及区域变质变形石英脉中较高，As、Sb 在泥板岩、泥灰岩、花岗斑岩及区域变质变形石英脉中较高，Bi、W、Mo 在花岗斑岩及区域变质变形石英脉中较高。反映本区成矿作用特点。

3.2　稀土元素组成特征

分别测定了各种容矿沉积岩石、花岗斑岩及矿化蚀变含金石英脉的稀土含量，石英细砂–粉砂岩、炭质板岩、泥板岩 ∑REE 最高，平均 149.13×10^{-6}（3 件），其次花岗斑岩达 81.06×10^{-6}（3 件），含金石英脉最低平均达 8.61×10^{-6}（2 件）。除石英脉外，稀土模式曲线均为右倾，岩浆岩斜率稍大于容矿沉积岩。

石英脉代表成矿热液稀土组成特征，明显亏损轻稀土，较好的继承容矿沉积岩和花岗斑岩的重稀土组成特征（图 4），这种亏损轻稀土和继承重稀土组成，均表明金的成矿经过有较强烈的岩浆叠加、构造改造和和热液分馏作用的发生。

3.3　流体包裹体特征

流体包裹体显微测温分析结果表明[13]，流体包裹体均一温度范围为 105~310℃，主要集中于 150~250℃。流体包裹体盐度($NaCl_{eq}$)为 1.6%~10.4%，主要集中在 1.6%~6.5%的低盐度范围。成矿流体显示中—低温、低盐度热液矿床特征，与卡林–类卡林型金矿类型一致。

4　稳定同位素组成与特征

4.1　硫同位素组成与特征

分别对含硫化物矿物的地层岩石中黄铁矿、矿石中硫化物矿物和石英脉中硫化物矿物进行单矿物分离，分别测定其硫同位素值。由于围岩片理化型矿石中硫化物矿化具多期、多阶段的叠加特征，致使分离不同期次和阶段的矿化产物相当困难，硫同位素分析（表 4）具有以下特征。

矿区外围未变形沉积地层中黄铁矿 $\delta^{34}S$ 较大负值，表明生物还原硫的主要来源，与地层中发育大量草莓状黄铁矿和炭质是一致的；在强烈变形的含矿岩系中，微细粒矿化黄铁矿、毒砂，$\delta^{34}S$ 显示中—低的正值，表明成矿构造与热液活动中由于氧化还原电位的升高，较强烈改造生物硫的结果；蚀变花岗斑岩和石英脉中较粗粒黄铁矿、毒砂，$\delta^{34}S$ 显示接近 0 值和小的负值，反映岩浆成因陨石硫的部分混入；成矿晚期辉锑矿网脉多发育在花岗斑岩中，其矿化时经同位素的同化作用，$\delta^{34}S$ 应受到地层炭质和花岗岩脉陨石硫的影响，

表 4　金矿床沉积成岩与矿化作用金属硫化物硫同位素组成

Table 4　Sulfur isotopic composition of metallic sulfide in the Yangshang gold deposit

样品类型（样品数）	形成序次	$\delta^{34}S$ 值范围	$\delta^{34}S$ 平均值
地层中草莓状及重结晶黄铁矿（5 件）	沉积成岩	–24.6‰～–29.0‰	-26.3‰
片理化粉砂-泥-灰-硅质互层岩层中微细粒状黄铁矿、毒砂（4 件）	早期韧性阶段	5.0‰～7.0‰	
矿化蚀变花岗斑岩中黄铁矿-毒砂（5 件）	中期韧脆性阶段	–2.9‰～–2.1‰	–2.5‰
石英脉中黄铁矿（5 件）	中—晚期阶段	0～–3‰	
石英-方解石脉中辉锑矿（4 件）	晚期阶段	–2‰～–5‰	

❶甘肃地质矿产局物化探队. 1986.

❷杨荣生. 博士论文, 北京大学地球与空间科学学院, 2006.

而具低的负值。

4.2 氢氧同位素组成与特征

氢氧同位素分析❶[14,15]投影,出现 3 个投影区域(图 6),1 区域分布于大气降水线附近,2 区域分布于原生岩浆水中,3 区域漂移大气降水线较远右侧(图 6)。图中之所以出现组成区的 3 个集中区域,主要与分析样品的类型、矿化蚀变期次及热液流体来源直接控制,三者相辅相成。

落在大气降水线附近的 1 区,样品采自稍远离花岗斑岩体的地层剪切构造带内的石英脉,含矿热液主要来自地层或地下水,矿化蚀变形成稍早。

基本落入原生岩浆水范围内的 2 区,样品来自与花岗斑岩构造体与地层接触构造带上的石英脉,显示中—晚期成矿特征,有岩浆水的参与混入,热液石英脉中可见岩浆岩副矿物锆石,表明在该构造接触带部位,热液活动强烈作用于花岗斑岩,发生交代同化与溶解作用。

远离大气降水线右侧的 3 区,样品来自安坝、葛条湾等主要矿区较晚成矿阶段的石英、方解石,该矿化蚀变矿物形成相对晚期阶段,含矿热液或为早期成矿的剩余,或热液集聚时间甚晚,理当受到较强烈的构造改造,自然成矿流体性质偏离大气降水较远。

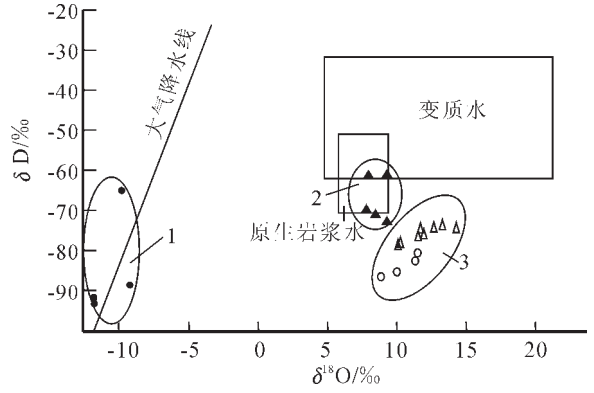


图 6 阳山金矿床含金石英氢氧同位素组成

1—近矿围岩中石英脉;2—花岗斑岩与围岩接触带石英脉;3—容矿围岩中石英脉

Fig.6 Hydrogen and oxygen isotopic compositions of auriferous quartz in the Yangshan gold deposit

1−Quartz vein in country rocks adjacent to ore;2−Quartz vein in the contact zone between granite porphyry and country rocks;3−Quartz vein in host rocks

5 矿床类型的复合与分解

上述研究表明❶,阳山金矿床成矿背景、成矿条件与控矿因素的叠加及改造相对复杂, 金的成矿作用多期多阶段,矿化特点形式多样,具有两种矿床类型的矿化形式与成矿地球化学特征,综合如下:

5.1 矿床的经典卡林型金矿床地质特征

阳山金矿床所表现的经典卡林型金矿特征,呈现典型的微细脉状、浸染状矿化蚀变[16],导致这一原因是,主成矿作用发生于构造变形的早—中期阶段,晚期脆性变形构造多不发育; 成矿地球化学元素组合具有严格的 Au−As−Hg−Sb −Ba 等组合,各成矿元素具有独立矿物出现,且早—中期阶段成矿作用形成的含金黄铁矿具有含砷增生环带,砷置换金属硫化物中硫时,使晶格中出现结构缺陷,导致金呈次显微形式赋存于含砷硫化物中; 容矿岩石属于薄互层状细碎屑岩−含炭泥灰岩−炭硅质沉积岩系组成;韧−脆性剪切变形构造叠加于细粒层状岩石之上;早—中期成矿作用属于沉积—中—轻微构造−热液改造成矿成因。

5.2 矿床的类卡林型金矿床地质特征

阳山金矿床所表现的类卡林型金矿床地质特征有:所显示的类卡林型矿化蚀变发生于成矿作用的中—晚期,该矿化蚀变相对强烈,呈稀疏浸染于花岗斑岩中,或断续石英脉状形式产于岩体与围岩接触带中。可叠加在早期微细脉浸染状矿化之上,也可单独出现;由于矿化较强烈且充分,砷的大量消耗,中—晚期成矿阶段于脆性构造中出现大量含矿石英脉体,并有显微明金出现使金进一步富集;此外,浅成花岗岩侵入含矿岩系或呈构造透镜体直接参与控矿的韧−脆性剪切构造带中,或使含矿岩系明显热变质,致使金进一步富集;控矿的韧性剪切带中内部未变形的浅成花岗斑岩构造透镜体普遍发生轻度中期阶段的黄铁矿−毒砂−绢云母化−硅化;成矿元素组合新增有岩浆带入的 Bi−Te 等亲石元素。

6 结 论

一般超大型金属矿床常为多因−叠加复合式成矿模式,微细浸染型金矿床的复合式成矿研究与实例报道很少,阳山金矿地质研究属于复合式典型矿床一例。该矿床复合式矿床的特点是:显示卡林型、类卡林型两种矿床矿化特征,(1)控矿因素分别由地层−韧脆性剪切构造及热液作用的改造和由地层−岩浆作用及热液作用的叠加所控制;(2)矿石分别呈微细粒细脉浸染状和石英脉状两种矿化形式;(3)矿石矿物分别由含砷金属硫化物(黄铁矿具增生环带)和不含砷金属硫化物组成;(4)金的赋存形式分别有不可见次显微金和可见明金;(5)成矿地球化学元素分别由 Au−As−Sb−Hg 和 Au−As−Te−Bi−Cu−Pb−Zn 组成。

当然,矿床总体特点未偏离沉积岩为容矿岩石的微细浸染型金矿床成矿特点及规律,属微细粒、难识别、低品位、大储量、难选矿。当前金价飙升,一些矿化岩石而金成为低品位矿石,无形给金的找矿与开发带来机遇,不同规模的卡林型金矿床储量升级,找矿出现新转机,给矿床地质工作与研究带来新的课题。

❶李晶. 甘肃阳山金矿成矿流体研究. 硕士论文, 北京大学地球与空间科学学院, 2006.

参考文献(Reference):

[1] 张复新, 肖丽, 齐亚林. 卡林型-类卡林型金矿床勘查与研究回顾及展望[J]. 中国地质, 2004, 31(4):407-412.
Zhang Fuxin, Xiao Li, Qi Yalin. Exploration and study of Carlin and Carlin-like type gold deposits:review and prospect[J]. Geology in China, 2004, 31(4):407-412(in Chinese with English abstract).

[2] 张复新. 陕西二台子金矿床黄铁矿的演化特征及其成因意义[J]. 矿物岩石, 1984, 4(1):22-28.
Zhang Fuxin. The evolutionary characteristics and the genetic significance of pyrites in Ertaizi gold deposit, Shaan xi Province[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1984, 4(1):22-28(in Chinese with English abstract).

[3] 张复新, 季军良, 龙灵利, 等. 南秦岭卡林型-类卡林型金矿床综合地质地球化学特征[J]. 地质论评, 2001, 47(5):492-499.
Zhang Fuxin, Ji Junliang, Long Lingli, et al. Comparative features of Carlin-para-Carlin type gold deposits in the south Qinling and gold deposits in other areas [J]. Geological Review, 2001, 47(5):492-499(in Chinese with English abstract).

[4] 程斌, 张复新, 贺国芬.甘肃文县地区阳山超大微细浸染型金矿床的成因与类型[J]. 地质通报, 2006, 25(11):1354-1360.
Cheng Bin, Zhang Fuxin, He Guofen. Genesis and types of the Yangshan super large micro-disseminated gold deposit, Wenxian, Gansu, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(11):1354-1360(in Chinese with English abstract).

[5] 张国伟, 程顺有, 郭安林, 等. 秦岭大别中央造山带南缘勉略古缝合带的的再认识—兼论中国大陆主体的拼合[J]. 地质通报, 2004, 23(9/10):846-853.
Zhang Guowei, Cheng Shunyou, Guo Anlin, et al. Mianlue Pale-suture on the southern margin of the Central Orogenic of the main part of the continent of China [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(9/10):846-853(in Chinese with English abstract).

[6] 杜子图, 吴淦国. 西秦岭地区构造体系及金成矿构造动力学[M]. 北京:地质出版社, 1998.
Du Zitu, Wu Ganguo. Study on Tectonic Systems and Gold Metallogenic Tectono-Dynamics in Region of West Qinling[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1998(in Chinese with English abstract).

[7] 王靖华, 张复新,于在平,等.秦岭金属矿床成矿系列与大陆造山带构造动力学背景[J]. 中国地质, 2002, 29(2):192-196.
Wang Jinghua, Zhang Fuxin, Yu Zaiping, et al. Minerogenetic series of metallic ore deposits in the Qinling Mountains and tectonodynamic background of the continental orogenic belts[J]. Geology in China, 2002, 29 (2):192-196 (in Chinese with English abstract).

[8] 齐金忠, 李莉, 袁世松, 等. 甘肃阳山金矿床石英脉中锆石 SHRIMPU-Pb 年代学研究[J]. 矿床地质, 2005, 24(2):141-149
QI Jinzhong, LI Li, Yuan Shisong, et al. A SHRIMP U-Pb chronological study of zircons from quartz veins of Yangshan gold deposit, Gansu Province[J]. Mineral Deposits, 2005, 24(2):141-149 (in Chinese with English abstract).

[9] 齐金忠, 杨贵才, 李莉, 等. 甘肃省阳山金矿床稳定同位素地球化学和成矿年代学及矿床成因[J]. 中国地质, 2006, 33(6):1345-1353.
Qi Jinzhong, Yang Guicai, Li Li, et al. Isotope geochemistry, chronology and genesis of the Yangshan gold deposit, Gansu [J]. Geology in China, 2006, 33(6):1345-1353(in Chinese with English abstract).

[10] 张复新, 马建秦, 陈衍景. 秦岭卡林型金矿床金、砷地球化学探讨[J]. 地球化学, 1999, 28(5):453-463
Zhang Fuxin, Ma Jianqin, Chen Yanjing. The study on geochemistry of gold and arsenic mineralization in Carlin type gold deposits, Qinling region [J]. Geochimica, 1999,28 (5):453-463(in Chinese with English abstract)

[11] 李志宏, 杨印, 彭省临, 等. 甘肃阳山超大型热液金矿床的成矿特征[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1):63-76.
Li Zhihong, Yang Yin, Peng Shenglin, et al. Metallogenic features of the Yangshan super-large hydrothermal gold deposit in Gansu [J]. Geotectonica et Metallogenia. 2007, 31 (1):63-76 (in Chinese with English abstract).

[12] 路远发. GeoKit:一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5):459-464.
Lu Yuanfa. GeoKit-A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. Geochimica, 2004, 33(5):459-464(in Chinese with English abstract).

[13] 齐金忠, 袁士松, 李莉, 等. 甘肃文县阳山金矿床地质地球化学研究[J]. 矿床地质, 2003, 22(1):24-31.
Qi Jinzhong, Yuan Shisong, Li Li, et al. Geological and geochemical studies of Yangshan gold deposit, gansu Province[J]. Mineral Deposit, 2003, 22 (1):24-31 (in Chinese with English abstract).

[14] 刘伟, 范永香, 齐金忠, 等. 甘肃文县阳山金矿床流体包裹体地球化学特征[J]. 现代地质, 2003, 17(4):444-452.
Liu Wei, Fan Yongxiang, Qi Jinzhong, et al. Fluid inclusion geochemistry characteristics of the Yangshan gold deposit in Wen County, Gansu Province,China[J]. Geoscience, 2003, 17(4):444-452(in Chinese with English abstract).

[15] 罗锡明, 齐金忠, 袁世松, 等. 甘肃阳山金矿床微量元素及稳定同位素地球化学研究[J]. 现代地质, 2004, 18(2):203-209.
Luo Ximing, Qi Jinzhong, Yuan Shisong, et al. Geological and microelement geochemical study of Yangshan gold deposit, Gansu Province [J]. Geoscience, 2004, 18 (2):203-209 (in Chinese with English abstract).

[16] Ressel M W, Henry C D. Igneous geology of the Carlin trend Nevada: development of the Eocene Plutonic complex and significance for Carlin-type gold deposits [J]. Economic Geology, 2006, 101(2):347-384.

Characteristics of the superlarge Yangshan Carlin and Carlin-like compound type gold deposit in Gansu

ZHANG Fu-xin[1], HOU Jun-fu[1], ZHANG Cun-wang[1], LI Jing[2], YANG Rong-sheng[3]

(1. *State Key Laboratory of Continental Dynamics(Northwest University), Department of Geology, Northwest University, Xi'an* 710069, *Shaanxi, China*; 2. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *Guangdong, China*; 3. *School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing* 100087, *China*)

Abstract: The Yangshan gold deposit is a very finely disseminated gold deposit, which was explored at the turn of the century and expanded into a superlarge deposit. The deposit was controlled by superposition and modification of many factors such as strata, hypabyssal granite-porphyry, brittle-ductile shear and hydrothermal activities. The gold deposit has the characteristics of both Carlin type and Carlin-like type mineralization. The Carlin-type mineralization occurred during the early, early-middle and late stages of ductile shearing, when there appeared the As-bearing pyrite-arsenopyrite-submicroscopic gold-dolomite-quartz assemblage and pyrite-stibnite-quartz-calcite assemblage, as well as the Au-As-Sb-Hg geochemical assemblage. The Carlin-like type mineralization took place during the middle-late stage of brittle shearing, which is characterized by the pyrite-arsenopyrite-native gold-tellurobismuthite-submicroscopic gold-dolomite-quartz assemblage (with chalcopyrite, chalcopyrite and chalcopyrite) and the Au-As-Cu-Pb-Zn-Te-Bi geochemical assemblage. The $\delta^{34}S$ values are −24.6‰ to −29.0‰ for sedimentary diagenetic pyrite in ore-bearing strata of the gold deposit, 5.0 to 7.0‰ for the metal sulfide formed during the early and early-middle stage of brittle-ductile shearing and −2.9 to −2.1‰ for the metal sulfide in altered granite porphyry of the middle-late mineralization stage, suggesting the multi-source features of mixing with biogenic sulfur in strata, crustal sulfur in strongly deformed orogenic belts and a little magmatic sulfur. The hydrogen and oxygen isotopes in fluid inclusions show nearly sympathetic variations with $\delta^{34}S$, and hydrothermal ore fluids are the mixture of underground fluids, strongly modified meteoric water and a little magmatic water.

Key words: superposed and modified mineralization; Carlin and Carlin-like compound type gold deposit; Yangshan; West Qinling

---

About the first author: ZHANG Fu-xin, male, born in 1945, professor and supervisor of doctoral candidates, mainly engages in the study of mineral deposit geology and geochemistry; E-mail: zhangfux@nwu.esu.cn.