

南秦岭汉阴金矿田长沟金矿陆内造山期构造-蚀变岩相填图与找矿模型

杨兴科¹, 韩珂¹, 何虎军¹, 张伟胜¹, 魏丽², 贾凤仪³

YANG Xingke¹, HAN Ke¹, HE Hujun¹, ZHANG Weisheng¹, WEI Li², JIA Fengyi³

1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;

2. 陕西省地质调查规划研究中心(陕西省地质勘查基金中心), 陕西 西安 710068;

3. 陕西地矿第一地质队有限公司, 陕西 安康 725000

1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Center of Geological Survey and Planning Research (Shaanxi Geological Exploration Fund Center), Xi'an 710068, Shaanxi, China;

3. No.1 Geological Party, Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration & Development, Ankang 725000, Shaanxi, China

摘要:大比例尺矿田构造-蚀变岩相填图技术是矿田构造物理化学研究和整装勘查区综合研究中逐渐形成的一项新技术。通过对南秦岭石泉-旬阳金矿整装勘查区调研和大比例尺矿田构造填图示范,认为在矿田尺度实施1:25000构造-岩相填图、在矿区尺度实施1:10000或1:5000构造-蚀变岩相填图是可行有效的。南秦岭汉阴北部金矿田近十年来经过矿田构造-蚀变岩相填图和专题研究,找矿预测进展较大。其中,长沟金矿是近年矿田构造-蚀变岩相填图找矿和整装勘查区综合研究新发现的、受脆-韧性剪切带控制的蚀变岩型金矿床。长沟金矿床位于脆-韧性剪切带DSZ3(RF5)内。含矿岩性主要是下志留统梅子垭组糜棱岩化含黑云母变斑晶绢云母石英片岩和含石榴子石绢云母石英片岩。与成矿密切相关的蚀变主要有黑云母化、硅化、黄铁矿化、绢云母化。当黑云母变斑晶发育、石英脉密集发育,伴有黄铁矿化,且离构造破碎带80~150 m时,金矿化品位较高。成矿流体主要属中-低温、中-低盐度、低密度的NaCl-H₂O-CO₂体系,成矿压力为41.03~98.04 MPa,成矿深度为1.52~3.63 km。与成矿有关的花岗闪长岩脉和花岗细晶岩锆石LA-ICP-MS年龄为180.2±3.6~176.0±1.9 Ma。长沟矿区黑云母变斑晶化蚀变岩金矿石中黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄为178.44±0.81 Ma,反等时线年龄为178.20±0.76 Ma。明确了该矿区蚀变岩成岩和金成矿时代为早侏罗世,成矿时代属于燕山期陆内。

关键词:构造物理化学;构造-蚀变岩相;脆-韧性剪切带;大比例尺矿田构造-蚀变岩相填图;汉阴县长沟金矿床;陆内造山期中图分类号:P618.51;P623 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2020)11-1715-11

Yang X K, Han K, He H J, Zhang W S, Wei L, Jia F Y. Intracontinental orogenic structure-altered lithofacies mapping and prospecting model of the Changgou gold deposit in the Hanyin gold orefield, South Qinling. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(11): 1715-1725

Abstract: The large-scale tectonic altered lithofacies mapping technology is a new technology gradually formed in the study of the tectonics-physico-chemistry of the orefield and the comprehensive study of the whole survey area. Based on the survey of the Shiquan-Xunyang gold mineralization belt in the South Qinling Mountain and the large-scale orefield structure mapping demonstration, it is considered that the 1:25000 tectonic-lithographic mapping implemented at the orefield scale and 1:10000 or 1:5000 structure-

收稿日期:2020-03-06;修订日期:2020-05-05

资助项目:国家自然科学基金项目《南秦岭金矿带典型矿床与成矿规律研究》(批准号:41872219)、陕西省地勘基金项目《陕西秦岭成矿带金矿成矿规律与找矿预测》(编号:61201506280)、中国地质调查局项目《陕西石泉-旬阳金矿整装勘查区关键基础地质研究》(编号:科[2014]04-02-063)、《陕西石泉-旬阳金矿整装勘查区专项填图与技术应用示范》(编号:12120114014201)及中央高校基本科研项目《秦岭陆内造山成矿作用与找矿建模研究》(编号:310827173702)

作者简介:杨兴科(1961-),男,教授,博士生导师,从事矿田地质、构造与成矿预测研究。E-mail: xky6105@chd.edu.cn

altered lithofacies mapping implemented at the mining area scale are feasible and effective. In the past ten years, the gold orefield in the north of Hanyin County, South Qinling, has made great progress in ore prospecting by structure-altered lithofacies mapping and special studies. The Changgou gold deposit in Hanyin County is a new type of altered rock type gold deposit controlled by brittle-ductile shear zones, which was discovered during comprehensive research on ore structure-altered rock facies mapping in recent years. The Changgou gold deposit is located in the DSZ3 brittle-ductile shear zone (RF5), where the lithology is mainly mylonitized biotite-bearing phenocryst sericite quartz schist and garnet bearing sericite quartz schist of Lower Silurian. The alterations of the rock closely related to mineralization are biotitization, silicification, pyrite mineralization, and sericitization. Where biotite morphology is developed and quartz veins are developed densely accompanied by pyrite mineralization and is about 80~150 meters away from the later stage main fracture belt, the gold mineralization grade is relatively high. The ore-forming fluid mainly belongs to the medium-low temperature, medium-low salinity, and low-density NaCl-H₂O-CO₂ system. The ore-forming pressure is from 41.03 MPa to 98.04 MPa and the ore-forming depth is from 1.52 km to 3.63 km. The granodiorite veins and granite aplite related to mineralization measured by U-Pb zircon LA-ICP-MS have ages from 180.2±3.6 Ma to 176.0±1.9 Ma. The ⁴⁰Ar-³⁹Ar age of biotite is 178.44±0.81 Ma, and the reverse isochron age is 178.20±0.76 Ma. It is obvious that the ore-forming epoch of altered rock and gold is early Jurassic, and the ore-forming age belongs to Yanshanian intracontinental orogeny in this orefield. Ore-controlling structures and metallogenic structural planes belong to the brittle-ductile shear zone and its fracture system. On the basis of this study, a prediction model of the intracontinental orogenic hydrothermal altered rock type gold deposit in the Changgou gold mining area was established, and it is inferred that the extensional shear fold superimposed altered rock on the left and the periphery of the northwest of the mining area seems to be a rich ore block. In addition, the prospecting direction in the deep area is pointed out.

Key words: tectono-physicochemistry; structure-altered lithofacies; brittle-ductile shear zone; large scale structure-altered lithofacies mapping; Changgou gold deposit of Hanyin County; intracontinental orogenic stage

矿田构造-蚀变作用指在矿田地质构造形成时或形成后,地质流体沿构造薄弱面、构造通道流动,并且与围岩发生水岩反应。蚀变岩是在构造和热液双重作用下,原岩的物理化学条件发生变化而产生的,在此过程中,形成了一种新的物理化学状态,并伴随岩石中成矿元素的迁移,形成新的矿物岩石组合或新的蚀变岩。影响矿田构造-矿化蚀变的因素较多,如地质体的成分、物理(如脆-韧性变形特征)化学(流体活动特征)性质等,以及成矿期热流体的成分、温度、酸碱度、氧逸度等特征^[1-2]。大比例尺矿田构造-蚀变岩相填图技术是伴随矿田构造调研、构造物理化学研究、整装勘查区找矿预测、侵入岩构造岩相及侵入岩填图方法技术等综合研究逐渐形成的一项新技术^[3-8],可作为蚀变岩填图的基本技术方法之一。它是针对热液型金属矿田、蚀变岩型金属矿床,有效查明成矿地质体、控矿构造和蚀变岩类型特征及构造物理化学成矿富集规律,圈定成矿富集中心和找矿靶区的的技术方法。

在中国地质调查局整装勘查区综合研究项目资助下,通过对南秦岭石泉-旬阳金矿整装勘查区调研和大比例尺填图示范^[3-6]①②,笔者认为在矿田尺度实施1:25000构造-岩相填编图研究、在矿区尺度实施1:10000或1:5000构造-蚀变岩相填编

图研究是可行有效的。

1 南秦岭汉阴北部长沟金矿研究背景

开展矿田区大比例尺构造-蚀变岩相填图的目的是查明矿田区蚀变岩相的种类、野外展布特征、规模等,对构造进行分类、分期等研究,在此基础上,结合室内相关测试分析,找出与矿化关系最密切的构造物理化学富集规律和蚀变岩相带分布规律,为下一步找矿预测提供更充分的地质依据。构造-蚀变岩相填图在生产上的应用主要体现在大比例尺填图、查找矿田区构造-蚀变岩相-矿化规律,为下一步矿田区深部和外围找矿及工程布置提供靶区;研究方面的应用主要是对成矿期流体顺构造迁移过程中与围岩发生水岩反应元素的迁移问题^[1]。能够在形成过程中发育较大规模蚀变带的矿床主要有热液型和斑岩型。一般构造-蚀变岩相带的分布范围远大于矿体的分布范围,并且蚀变带中的矿物组合有一定的空间分布规律,最适合使用该填图方法来判断地表或钻孔所处的位置在成矿构造-矿化-蚀变体系中位于何处,即圈定矿化富集中心或成矿富集中心。

长沟金矿位于国家级整装勘查区——陕西省石泉-旬阳金矿整装勘查区,地理位置是陕西省安

康市汉阴县北部铁佛镇^{[5]①②}。地理坐标: 东经 108°35'30"~108°36'55"、北纬 32°58'58"~33°00'01"。平面上矿区大体呈长方形, 长约 5 km, 宽约 3 km, 面积约 15 km²。截至 2015 年, 长沟金矿区探获金资源量(332+333): 矿石量约 114×10⁴ t, 金金属量约 2.77 t, Au 平均品位 2.43×10⁻⁶, 目前勘查评价为一小型矿床规模。但如果将长沟金矿床与同一矿区东延鹿鸣金矿床探明金资源量累加, 再考虑东延沙沟金矿床等, 矿床规模可达中大型。据已经开采 20 多年的东延鹿鸣金矿床截止 2010 年金资源量统计的保有金矿石量约 68.8×10⁴ t 和高品位金金属量 1.1 t, 估算保有资源量加低品位金矿资源量合计约 150×10⁴ t, 金金属量可达 24 t。

因此, 考虑长沟金矿周边同类型成矿带内已发现的现有多个中小型金矿床(如东延鹿鸣金矿床、沙沟金矿床、白桑园柳坑金矿床等, 北邻矿带黄龙金矿、石板沟金矿、八庙沟金矿、金斗坡金矿, 南邻矿带吴家湾金矿、韩家湾金矿等)^{①②}, 仅汉阴北部金矿田累加金资源量可达大型金矿床。这类金矿成因类型多属于热液型, 可划归造山型金矿, 矿床工业类型可归属为与造山作用相关的脆-韧性剪切带

蚀变岩型金矿。本文最新研究揭示, 主成矿时代在侏罗纪, 应该划归陆内造山期。

2 矿区地质特征

陕西省石泉-汉阴北部金矿带东西长约 100 km, 南北宽 10~20 km, 位于南秦岭牛山穹窿北部, 西邻扬子板块^[9]北缘汉南杂岩隆起区, 东接武当古陆, 其构造位置属南秦岭构造带^[9]韧性滑脱逆冲推覆构造带二级单元、石泉-神河韧性滑脱逆冲推覆构造带三级单元。该成矿带自西向东依次分布羊坪湾、箱子寨、水田坪、金斗坡、黄龙、长沟、鹿鸣、沙沟、柳坑、吴家湾、柳树坪等数十处规模不等, 成矿特征类似的金矿床^{①②}, 长沟金矿位于石泉-汉阴-旬阳金矿带中段偏南部(图 1)。

该区经历了新元古代、加里东期、印支期、燕山期、喜马拉雅期等多期次的复杂构造运动, 前印支期整体以伸展滑脱构造作用为主。印支期呈现大规模的南北向挤压作用^[3-4, 9], 为区内主要构造变形形迹和岩石发生变形变质的主因; 晚印支期, 变形主要发生于长沟金矿以西的局部地区; 燕山早期区域上变形较弱, 仅在铁佛一带发生较强烈的变形;

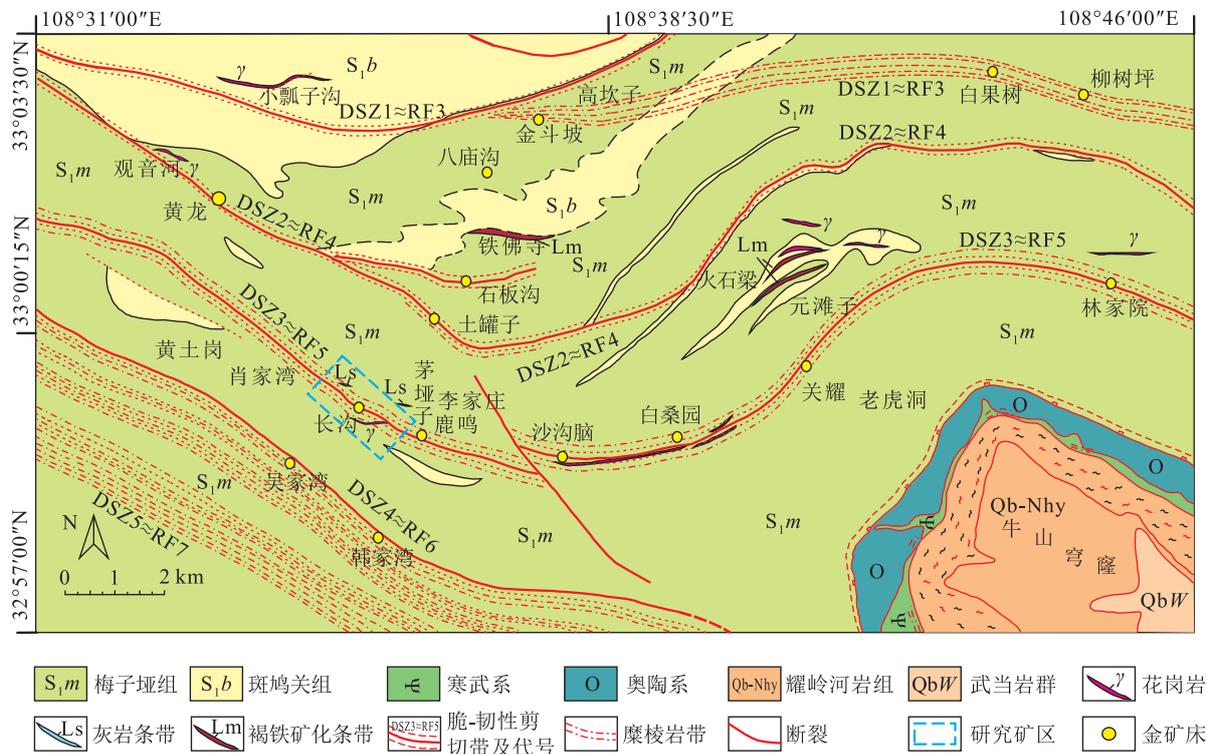


图 1 汉阴北部金矿田 1 : 25000 构造-岩相图与脆-韧性剪切带 DSZ 分布^①

Fig. 1 1 : 25000 structural lithofacies map and distribution of brittle-ductile shear zone in northern Hanyin gold orefield

燕山晚期表现为出现较广泛分布的北北东向张扭性节理裂隙,但规模较小;新生代以来该区发育一系列北西向断裂和走滑隆陷山间盆地。较重要的金矿成矿期构造-岩浆-蚀变-矿化富集期主要在晚印支期—燕山期,尤其以晚三叠世—侏罗纪为主,从秦岭带构造演化阶段分析,金矿成矿期主要发生在燕山期陆内造山期构造演化阶段。

经多个专题研究和地质调查局整装勘查区综合研究,将汉阴北部金矿田由北向南依次划分出5条规模较大的脆-韧性剪切带(Brittle-Ductile Shear Zone,简称DSZ)^{[5]①②}。通过1:25000矿田构造-岩相填图与专题研究,发现汉阴北部所有金矿床点均落入不同的脆-韧性剪切带内(图1、图2)。近十年发现的长沟金矿床位于脆-韧性剪切带DSZ3^{[5]①②}(或前人称为韧脆性断裂带RF5^③)内。

长沟金矿区西起肖家湾—长沟脑一带,东至李家庄—鹿鸣一带,东西长约3 km;北起陈家湾—贾家湾一带,南至肖家湾—李家湾一带(图2),约2 km,矿区面积约6 km²。下志留统梅子垭组中-浅变质岩系是长沟矿区最主要的岩石,也是金矿体的赋矿岩石,原岩主要为一套已变形变质的泥质碎屑岩。梅子垭组主要岩性为绢云母石英片岩、含石榴子石黑云母变斑晶绢云母石英片岩、含炭绢云母石英片岩、变石英砂岩、少量硅质条带等。梅子垭组岩石变形强烈、片理化发育,多具有糜棱岩化典型特征,普遍发育揉皱和面理置换现象。韧性剪切带内次级脆性断层发育,断层面附近岩石破碎,可见较多的断层泥、石英脉、石英透镜体等。矿区主要见有花岗闪长岩脉,呈细脉状顺片理面侵入,其出露长100~200 m、宽1~3 m(图2)。区内石英细脉较发育,宽者达35 cm,主要矿化蚀变有黄铁矿化、褐铁矿化、硅化、绿泥石化、黑云母变斑晶化、石榴子石化等。

3 矿床地质特征与成矿类型

3.1 矿床地质特征

长沟矿区现共圈出8条金矿体,厚度0.8~3.5 m,平均品位 2.5×10^{-6} ,矿体主要受脆-韧性剪切带DSZ3(RF5)控制,多呈倾斜的条带状产出。其中K1、K2、K3矿体分布于西部长沟脑一带,宏观上位于DSZ3(RF5)下盘;K4、K5-1、K5-2、K6矿体分布于东部陈家湾一带,宏观上位于DSZ3(RF5)上盘

(图2)。矿区内控制程度较高的主要矿体为K1、K2、K4和K6。

K1矿体位于长沟脑一带,总体呈中等-陡倾斜的似层状,岩性为黑云母变斑晶绢云母石英片岩,发育硅化、黄铁矿化和黑云母化。矿体产状 $20^\circ \angle 68^\circ$,厚度为0.86~5.54 m,平均厚度2.84 m;品位在 1.23×10^{-6} ~ 4.90×10^{-6} 之间,平均品位 2.45×10^{-6} 。

K2矿体位于长沟脑一带,在K1矿体南侧,与K1矿体平行产出。受顺层片理化带控制,总体形态呈中等-陡倾斜的似层状,沿走向和倾向均具波状弯曲、膨胀收缩现象,产状 $20^\circ \angle 62^\circ$,厚度在0.95~4.43 m之间,平均厚度2.20 m;品位在 1.53×10^{-6} ~ 4.09×10^{-6} 之间,平均品位 2.35×10^{-6} 。

K4矿体出露于肖家湾一带,受顺层片理化带控制,岩石变形强烈,片理化发育,顶板为变砂岩,底部为强烈碳化的顺层断层破碎带,矿体宏观识别标志明显。总体形态呈中等-陡倾斜的似层状,沿走向和倾向均具波状弯曲、膨胀收缩、分枝复合现象。矿体产状 $25^\circ \angle 67^\circ$,厚度为0.87~11.13 m,平均厚度3.53 m;矿体品位在 1.10×10^{-6} ~ 5.05×10^{-6} 之间,平均品位 2.40×10^{-6} 。

K6矿体分布于K4矿体北部,受顺层韧性剪切带控制,呈中等倾斜的似层状,沿走向和倾向均具波状弯曲、膨胀收缩现象。矿体产状 $27^\circ \angle 53^\circ$,厚度0.87~6.18 m,平均厚度3.08 m;矿体品位在 1.28×10^{-6} ~ 3.33×10^{-6} 之间,平均品位 2.58×10^{-6} 。

长沟矿区与金矿化密切相关的围岩主要有糜棱岩化含黑云母变斑晶绢云母石英片岩和含石榴子石绢云母石英片岩,金矿石类型按矿物成分与形态特征,分为蚀变岩型和石英细脉型。其中蚀变岩型矿石可独自构成工业矿体,是该区的主要矿石类型。其主要为糜棱岩化含石榴子石黑云母变斑晶绢云母石英片岩,鳞片变晶结构、片状构造。主要金属矿物为黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、少量自然金等,其总含量低于矿物总量7%。次要矿石类型为石英细脉型,常与蚀变岩型矿石一同组成工业矿体,其金属矿物约占3%。这两类矿石中载金硫化物多以细脉浸染方式沿裂隙或片理面、糜棱面理分布。金的赋存状态以粒间金为主,占72%,其次为裂隙金,占16%,包裹金最少,仅为12%。

3.2 成矿类型和成矿时代

区域构造位置位于扬子板块北缘南秦岭带南

部晚印支期—燕山期陆内构造带。控矿构造为近东西向—北西西向脆—韧性剪切带 DSZ3(≈RF5)。多期构造面理置换明显。

围岩蚀变:金矿体产在志留系变质石英片岩或原岩可能是一套已变质的黑色岩系。与金成矿密切相关的围岩蚀变主要有黑云母变斑晶化、硅化、黄铁矿化、碳化。当黑云母变斑晶发育,石英细脉密集发育,伴有黄铁矿化时,且离晚期主构造破碎带(F5)在 80~150 m,金矿化品位较高。

矿化类型:大部分为蚀变岩型,具体为蚀变的变质片岩,少量为中浅变质岩中产出的石英细脉型。

成矿流体性质:成矿流体主要集中在 210~280℃,属于中—低温(175~300℃)、部分为中高温(300~380℃)、中—低盐度(0.88%~19.05%)、低密度(0.63~0.99 g/cm³)的 NaCl-H₂O-CO₂ 体系。估算成矿压力为 41.03~98.04 MPa,成矿深度在 1.52~3.63 km 之间。

成矿类型:对比秦岭造山型金矿特征^[10],长沟金矿与造山型金矿床特征类似,但也有其特殊性,表现出与印支期主造山期成矿阶段并不配套,而应以燕山期陆内造山型金矿类型为主。根据该矿床主要受脆—韧性剪切带控矿,志留系变质细碎屑岩和变质黑色岩系及燕山期花岗岩脉、煌斑岩脉可能为金矿源岩,金矿化以蚀变岩为主、变质片岩中的石英细脉为辅,流体包裹体以中低温—个别中高温、盐度中低等特征,将其成因类型划归为热液型金矿,可能以陆内造山期构造动力热液为主,工业类型可划归脆—韧性剪切带控制的蚀变岩型金矿床。

对南秦岭汉阴一带金矿成矿时代的研究,前人虽有涉及,但有效研究数据偏少。前期多数研究者多推断以印支期为主,包括笔者专题组 2009—2012 年对长沟金矿的初期研究,推断金成矿时代在晚印支期—燕山期^{[5]①}。吴闻人等^③获得石泉一带志留系变质片岩中黑云母 K-Ar 年龄约为 184 Ma,朱华平等^[11]认为南秦岭多个金矿形成于燕山期。高怀雄等^[6]获得羊坪湾金矿黄铁矿 Rb-Sr 年龄为 208 Ma,是否有代表性仍需研究证实。但通过笔者近年的持续研究和对相关矿物成矿时代的测试,确定与金矿有关的剪切变形时代和蚀变时代及花岗岩脉时代主体均在侏罗纪^②,应归属燕山期合适。所以近年多数研究者都倾向成矿时代归属于燕山期陆内造山阶段。

本次选取汉阴黄龙金矿西北部观音河花岗闪长岩脉和沈坝矿区柳坑矿段黑云母花岗细晶岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,2 条岩脉均与 S₂ 期面理平行,顺面理发育。单颗粒锆石挑选在河北廊坊诚信地质服务公司完成,制靶和测试工作在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。本次对黄龙金矿区北邻的观音河花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年,16 个锆石年龄加权平均值为 180.2±3.6 Ma(MSWD=0.37);对长沟矿区东邻鹿鸣金矿东侧处在同一条成矿带的沈坝白桑园柳坑金矿钻孔中发现的细晶花岗岩,经 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年,16 个锆石年龄加权平均值为 176.0±1.9 Ma(MSWD=1.30)。对采自长沟矿区的 1 件黑云母变斑晶化蚀变岩金矿石样品,在河北区域地质矿产调查研究所挑选黑云母单矿物样,在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成黑云母 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素年龄测试,测得黑云母 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素坪年龄为 178.44±0.81 Ma(MSWD=2.8),反等时线年龄为 178.20±0.76 Ma(MSWD=1.9)。反映该区与金矿成矿密切相关的矿物岩石的成岩成矿时代总体为早中侏罗世,应归属于燕山期。

西邻区石泉饶丰一带韧性剪切带 S₂ 面理中黑云母 Ar-Ar 年龄为 161~169 Ma^[12];安康断裂带北侧附近韧性剪切带内面理中云母 Ar-Ar 年龄为 178~163 Ma^[13],安康断裂带南侧凤凰山穹窿北缘韧性剪切带黑云母 Ar-Ar 年龄为 222~189 Ma^[13]。根据这些测年数据和剪切变形特征分析,S₂ 面理变形时代大体对应侏罗纪,也属于燕山期。

研究区处于汉阴北部一系列大型走滑—推覆—伸展型脆—韧性剪切带内,该带的形成是由于汉阴北部金矿田南北两侧晚期发生的安康断裂和宁陕断裂带的剧烈走滑剪切运动造成。安康断裂和宁陕断裂分别形成于 161.2~173.5 Ma 和 186.0±4.0 Ma^[14]。由此推断,长沟矿区脆—韧性剪切带也与此期活动有关。

区域脆—韧性剪切带是该区主要的控矿构造,属于晚印支期—燕山期成矿构造;矿区岩浆岩顺 S₂ 面理发育,推断岩浆岩应与 S₂ 面理同期或稍晚期发育,而 S₂ 面理对该区金矿体具有一定的控制作用,两者为同期发育。综合研究推断,长沟矿区的成矿时代主要在侏罗纪,属南秦岭燕山期陆内造山期构造变形—岩浆侵位—热液成矿富集期。

4 成矿构造与成矿结构面特征

长沟金矿区的矿体基本上分布于区域 DSZ3 (\approx RF5) 脆-韧性剪切带, 矿体的延伸和展布主要受该脆-韧性剪切带控制(图 3)。脆-韧性剪切带是介于脆性剪切带与韧性剪切带之间的过渡型剪切带, 它不仅是重要的控矿构造, 其剪切作用过程也伴随成矿作用过程。研究发现, 多数金矿床与脆-韧性剪切带有直接或间接的关系。

4.1 脆-韧性剪切带对矿化蚀变带的控制

通过对长沟金矿区 Au 原生晕圈定研究, 发现矿区土壤测量异常等值线与脆-韧性剪切带的平面分布和表现类似^{[5]①}, 表明该脆-韧性剪切带对金矿化分布有一定控制作用。

通过对矿区进行 1:10000 构造-蚀变岩相填图(图 3)发现, 在矿区 DSZ3(RF5) 脆-韧性剪切带及其附近, 发育黑云母变斑晶密集带、石英脉密集带、石榴子石密集带等一系列热液蚀变岩带, 蚀变带的分布大体与脆-韧性剪切带分布有空间相关性, 所以, 矿区脆-韧性剪切带对热液蚀变岩带也具有一定的控制作用。

长沟矿区 28 勘探线剖面图(图 4)显示, 金矿体 K4 产于脆-韧性剪切带 DSZ3(RF5) 的次级断层破碎带上, 在该带发育大量强蚀变带、石英细脉和透视镜体、炭化、黄铁矿化、黑云母变斑晶密集带等, 且金矿(化)体形成于 DSZ3 带内, 对金矿体和蚀变带具有显著的控制作用。

4.2 S_2 面理对矿体的控制

长沟金矿控制矿体赋存的成矿结构面为 S_2 面理, 应属于次生成矿结构面, 即成矿地质体形成以后产生的构造界面。在长沟金矿区野外调研发现, S_2 面理总体倾向北东—北北东, 倾角变化较大。顺 S_2 面理可见新生矿物黑云母、绢云母、黄铁矿等发育, 局部见石榴子石、透闪石、电气石等。片状矿物通常在 S_2 面理定向排列, 表现为黑云母、黑云母变斑晶、绢云母等矿物的长轴具有定向性顺 S_2 面理排列(图 5)。此外, 矿区内顺 S_2 面理发育石英条带、黄铁矿、磁黄铁矿细脉等, 部分与 S_2 面理已发生同步弯曲变形。在陆内造山过程中, 热液活动顺主变形期面理流动, 形成一系列顺 S_2 面理发育的石英条带、黄铁矿、磁黄铁矿细脉等, 早于第二期主变形期形成的条带状脉体(顺 S_0 、 S_1 发育)和主变形期(S_2)

形成的脉体, 在区域构造应力的作用下发生塑性流变(矿区构造多表现为塑性变形), 使其随本次构造变形被拉长、挤压或压扁, 形成各种褶皱、旋转构造, 规模不一, 均指示了由北向南的挤压推覆作用。在构造变形强烈部位可形成脆-韧性剪切带, 表现为岩石的糜棱岩化。

S_2 面理对金矿的产出及赋存状态具有重要的控制作用, 从多个中段(坑道)控矿构造-蚀变岩相填图发现, 金矿体向深部延深规模大, 且矿体产状和变形面理 S_2 基本一致, 矿体呈似层状、长透镜状。在 S_2 面理转折端处厚度增大、品位增高。在金矿体发育部位往往伴生黑云母变斑晶化、黄铁矿化、磁黄铁矿化、硅化、绢云母化等, 表现为黑云母变斑晶、拔丝状黄铁矿、磁黄铁矿、石英细脉等顺金矿体 S_2 面理发育(图 5)。黑云母化、黄铁矿化、磁黄铁矿化、硅化、绢云母化等蚀变与金的成矿富集具有密切的关系。

5 成矿作用特征标志与成矿机制

5.1 成矿作用特征标志

热液蚀变矿物是金矿化的有利标志, 如黑云母变斑晶、石榴子石、硅化、黄铁矿化、磁黄铁矿化等。蚀变类型有黑云母化、硅化、黄铁矿化、黄钾铁矾化、绿泥石化、碳酸盐化等, 与成矿有关的为黑云母化、硅化和磁黄铁矿化、黄钾铁矾化。

(1) 硅化相对较普遍, 主要有 2 种。一种是呈石英细脉、小扁豆体沿岩石的片理、裂隙、劈理分布, 石英呈烟灰色、青灰色和灰白色; 另一种是石英呈网脉、团块分布于岩石中(图 5), 尤其是在高应变区域可以形成一定的密集带, 硅化表现为沿脆-韧性剪切带出现大量脉状、透镜状石英脉或石英团块。分为 3 期, 顺 S_2 面理贯入石英脉为含金石英脉(图 5)。面状硅化蚀变不明显。硅化是金矿形成的有利条件, 在网脉状硅化较强部位与脉状硫化物共聚集部位, 金有明显的富集。

(2) 黑云母变斑晶化(钾化)。矿区变形变质的泥质细碎屑岩中可见细小的黑云母颗粒或稍大斑晶状黑云母, 呈团斑状或聚片状分布, 黑云母变斑晶较普遍, 主要分布于脆-韧性剪切带。研究证实, 黑云母变斑晶为区域变质作用后期叠加了较强烈的热变质作用, 与该区金成矿作用密切相关, 代表了热液蚀变或热变质叠加的蚀变类型。

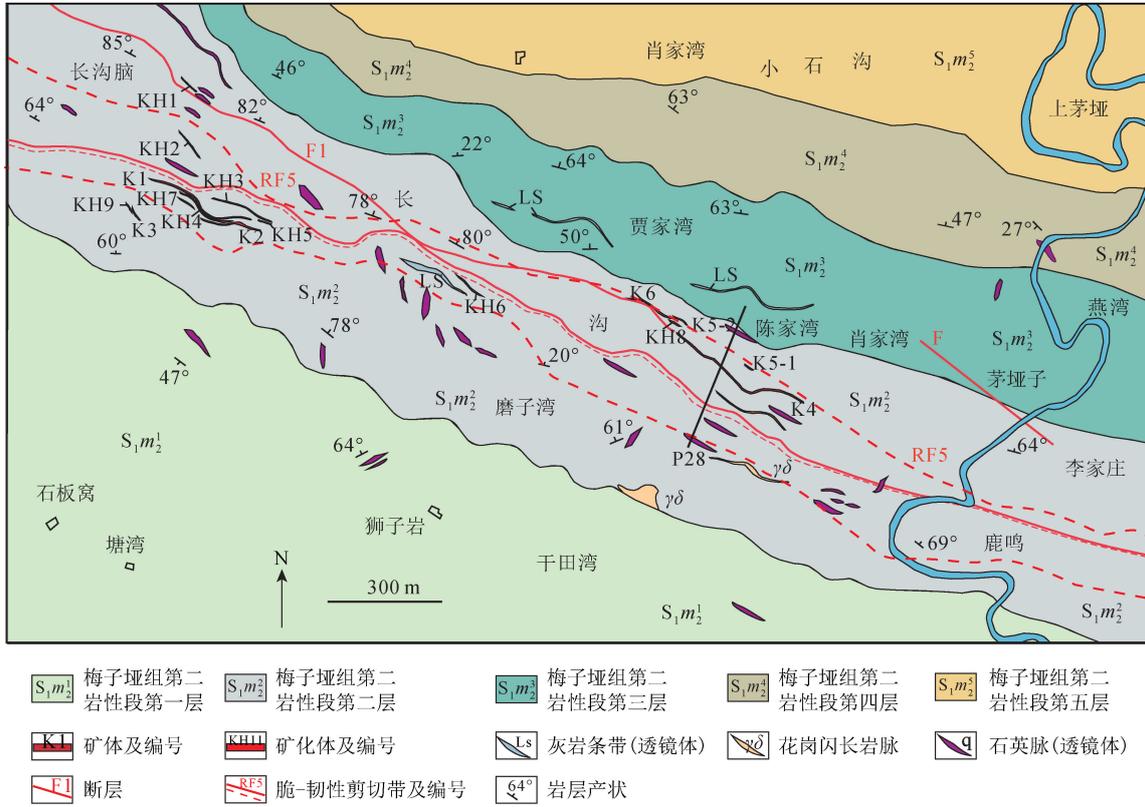


图 2 1 : 10000 structure-altered lithofacies map of the Changgou gold ore district

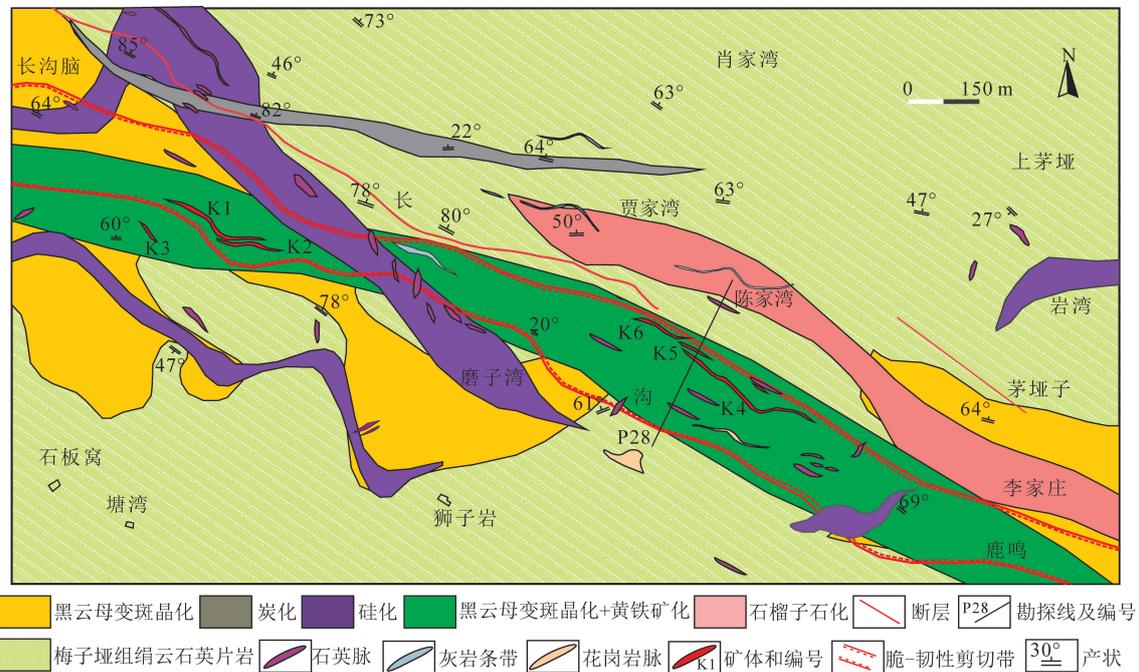


图 3 Structure-altered rock types controlled by the brittle-ductile shear zone DSZ3 in the Changgou gold ore district in northern Hanyin

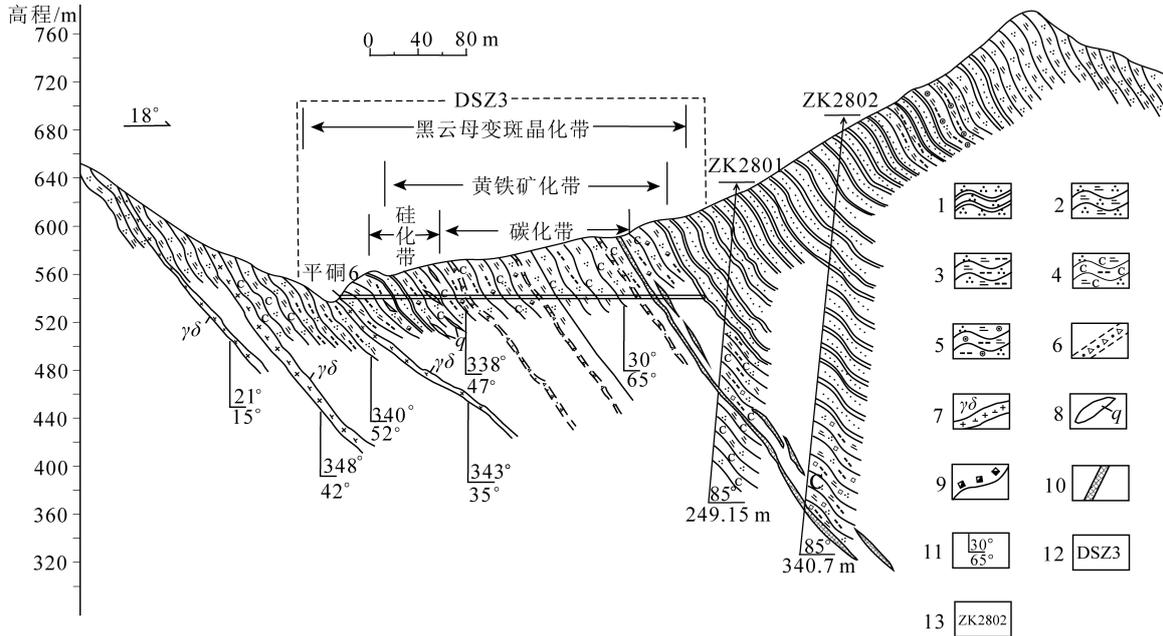


图4 长沟金矿区28勘探线控矿构造-蚀变与花岗闪长岩脉分布图

Fig. 4 Ore control structure alteration and granodiorite vein distribution along No. 28 exploration line of the Changgou gold ore district

- 1—变石英砂岩;2—绢云母石英片岩;3—含黑云母变斑晶绢云母石英片岩;4—含炭黑云母变斑晶绢云母石英片岩;
5—含石榴子石绢云母石英片岩;6—断层破碎带;7—花岗闪长岩脉;8—石英脉;9—黄铁矿化;
10—矿体;11— S_2 面理产状(倾向/倾角);12—脆-韧性剪切带编号;13—钻孔编号

(3)黄铁矿化较发育。一种是半自形粒状黄铁矿沿岩石裂隙、劈理、片理呈细脉、网脉产出,另一种是自形-半自形粒状黄铁矿分布于早、中期石英脉的裂隙中。黄铁矿化与金矿化关系非常密切,二者紧密共生,黄铁矿化很弱的地段,一般金达不到工业品位。磁黄铁矿化与金矿化关系较密切。

(4)绿泥石化不发育。主要在石英脉边部,有的黑云母受热液影响蚀变成绿泥石,蚀变范围较小。

(5)碳酸盐化。在热液活动晚期,少量方解石与石英一起形成少量碳酸盐-石英脉,与金矿关系不大。

上述蚀变标志与成矿有关的主要有黑云母化、硅化和黄铁矿化,当黑云母变斑晶发育,硅化石英细脉或网脉发育,且伴有黄铁矿化时,金矿化品位往往较高。在梅子垭组石英细脉较发育,但在金矿体及其上下蚀变岩层附近,石英细脉数量明显增多。

通过野外调研,发现岩石中的拔丝状构造与 S_2 面理关系极密切,可见拔丝状黄铁矿、拔丝状磁黄铁矿、拔丝状石英细脉(图5),通常宽1~3 mm,平行 S_2 面理发育。在对金矿体的观察和研究中发现,

凡是赋矿岩石,即含炭绢云母石英片岩、含黑云母变斑晶绢云母石英片岩中几乎都发育拔丝状构造,特别是当这种构造发育较密集时,金矿体相应的成矿会更好。由此可见,这种顺 S_2 面理发育的拔丝状构造与金矿化关系极密切,且在野外可作为一种重要的找矿识别标志。

5.2 成矿机制

长沟金矿的成矿富集期处于燕山期(侏罗纪)陆内造山期,矿区主控构造脆-韧性剪切带DSZ3(\approx RF5)制约了金矿床的空间位置及金矿体产出的具体部位,为该区金成矿作用提供了热液运移通道和热动力。在研究区深部的韧性剪切带随着南秦岭带变形抬升剥蚀,深部热液顺着脆-韧性剪切带形成的断裂向浅部运移,且在热液上升过程中,大气降水顺断裂破碎带等渗入地下与之混合,改变了热液性质,当到达脆-韧性变形转换带部位时,其构造物理化学环境发生变化,达到热液成矿的有利条件,成矿热液中的硅质成分沿糜棱面理和片理固结沉淀,形成硅化、石英细脉、石英透镜体等,黄铁矿等金属硫化物、Au元素等在变质片岩的石英颗粒

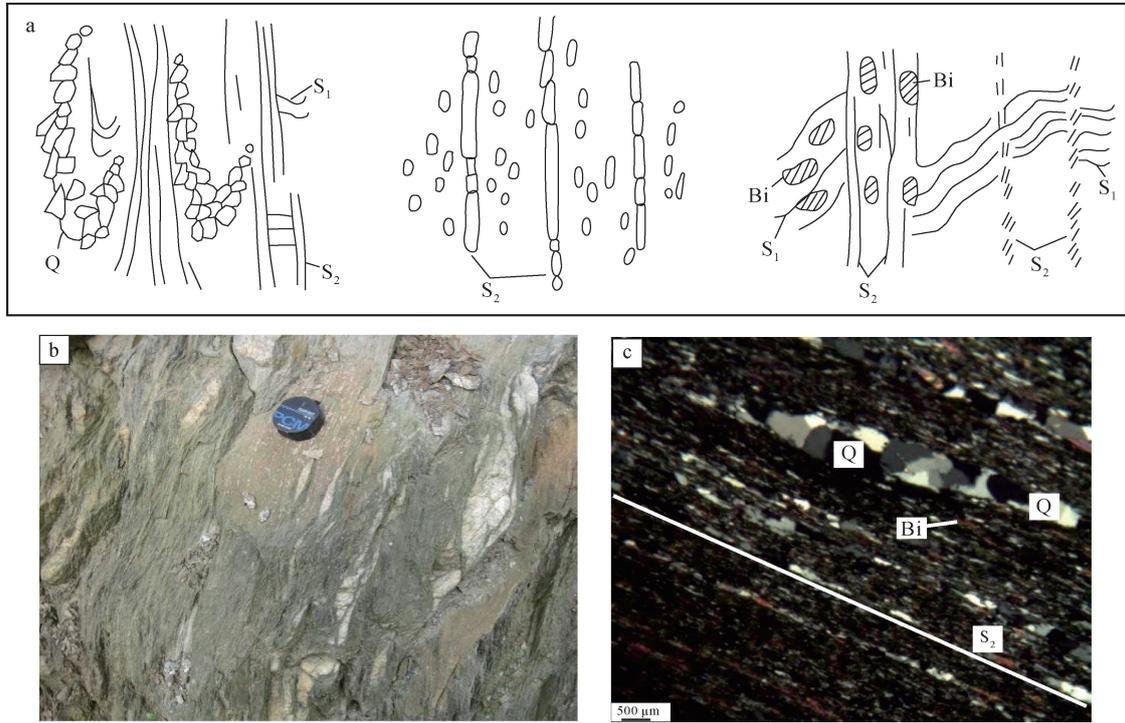


图 5 长沟金矿区新生矿物和石英细脉顺 S₂ 面理定向发育特征素描 (a) 和照片 (b、c)

Fig. 5 Orientation development of new minerals and quartz veinlet along S₂ foliation in the Changgou gold ore district

Q—石英;Bi—黑云母;S₁—第一期面理;S₂—第二期面理;a—左图为早期 S₁ 面理和石英团块被 S₂ 面理切穿,中图为沿 S₂ 面理分布的石英脉和团块,右图为沿 S₁ 和 S₂ 面理分布的斑晶状黑云母;b—顺 S₂ 面理产出的石英脉;c—黑云母斑晶石英(细粒化和糜棱岩化)云母糜棱片岩显微照片,10×4(+)

间沉淀富集。后又经过多期次构造变形作用和热变质作用改造,使金矿化富集,且与围岩发生多种蚀变作用,形成黑云母变斑晶、石榴子石等热变质矿物,最终形成变质片岩基础上的蚀变岩和石英细脉型金矿石。

通过以上分析,该区脆-韧性剪切带 DSZ3(≈RF5)对金矿体和矿化蚀变带具有显著的控制作用,尤其在大量出现脆-韧性剪切带标志叠加的区域,如断层破碎带、面理明显突变部位、明显的揉皱变形部位等,往往出现大量的矿化集中区。这些现象主要是由矿区的脆-韧性剪切带导致的一系列成矿构造;结合对矿区矿石一系列微观变形现象的分析,认为脆-韧性剪切带是该区主要的控矿构造。

5.3 找矿预测与建模

该矿区经历了多期构造变形,燕山早期南秦岭进入陆内造山演化阶段,在此阶段,区域应力-应变状态可能为主造山挤压后期发育的走滑-伸展-剪切构造,主要构造样式为区域近东西向逆冲推覆-伸展滑覆-走滑剪切构造组合。梅子垭组岩层受构

造应力作用发生一系列复杂的变质变形,形成线理、面理等多期构造置换,早期残留的 S₀ 面理或 S₁ 面理被置换,形成新生 S₂ 面理,同时在先期形成的韧性剪切带内沿 2 种能干性存在差异的岩性界面易形成剪切滑动面,为成矿热液的运移提供了良好的空间,而在构造变形过程中形成的右行斜列展布石英脉、节理裂隙等构造,为成矿作用提供了储矿空间,脆-韧性剪切作用形成的动力变质热液与围岩发生水岩反应并形成黑云母变斑晶化、黄铁矿化等蚀变和金的初步矿化富集。燕山中晚期,矿区进入新的构造-热液-成矿活动期,随着构造回落变形过程中韧性剪切带内拉张扩容空间的形成,花岗岩浆顺其侵位并稍有影响,在岩浆期后热液作用下,继续发生强烈的蚀变矿化,叠加在早期矿化基础上,同时形成大量的黑云母变斑晶、黄铁矿等热液蚀变矿物。由于岩性界面通常为构造薄弱带,与矿化关系密切的热液蚀变主要是黑云母变斑晶化、黄铁矿化等,金矿体往往产出在不同的岩性界面-应变带上,具体表现为金矿体多产在黑云母变斑晶绢

云石英片岩、含炭绢云石英片岩和变质石英细砂岩 3 种岩性界面的接触带上。在断层破碎带及其附近的斜列式节理、劈理等裂隙中也可见矿化体呈雁列式展布。在矿区北西侧深部则出现左列排列样式，矿区深部外围表现出伸展型剪切褶皱叠加蚀变岩，类似鹿鸣金矿深部特征，这些地段经鹿鸣金矿深部工程验证，多为富金矿段。此外，随着变形带温压升高，脆-韧性剪切带 DSZ 的强应变域内岩石褶皱变形较强烈，一般褶皱的核部、转折端膨大部位，也多是成矿热液的良好赋矿空间，常会形成富矿，矿体增厚、品位升高。据此建模(图 6;表 1)并指出了深部找矿方向。

6 结 论

(1) 首次采用矿田尺度 1 : 25000、矿区尺度 1 : 10000 构造-蚀变岩相填图方法技术,对南秦岭

汉阴北部金矿田和长沟金矿区进行了综合研究,获得矿田和矿区两种尺度的构造-蚀变岩相图,划分出矿田 5 条控矿脆-韧性剪切带。

(2) 查明并预测了汉阴长沟金矿脆-韧性剪切带和断裂破碎带控矿构造及矿体左列斜列富集规律。发现长沟金矿体主要以矿化蚀变岩和含金石英细脉产于下志留统梅子垭组第二岩性段云母石英片岩夹变质石英细砂岩条带中,受区域脆-韧性剪切带 DSZ3 及次级断裂破碎带控制。矿体呈透镜状和脉状,走向近东西向或北西-南东向,与矿区构造线一致,平面为左列右倾斜列产出,剖面呈雁列式左侧斜列。据透镜状矿体斜列规律,预测在长沟矿区已知 K1~K3 和 K4~K6 矿体的北西侧更深部位可能有较富大矿体呈左列斜列状产出。

(3) 长沟金矿成因类型为与燕山期陆内造山期有关热液型金矿,工业类型为陆内造山期脆-韧性

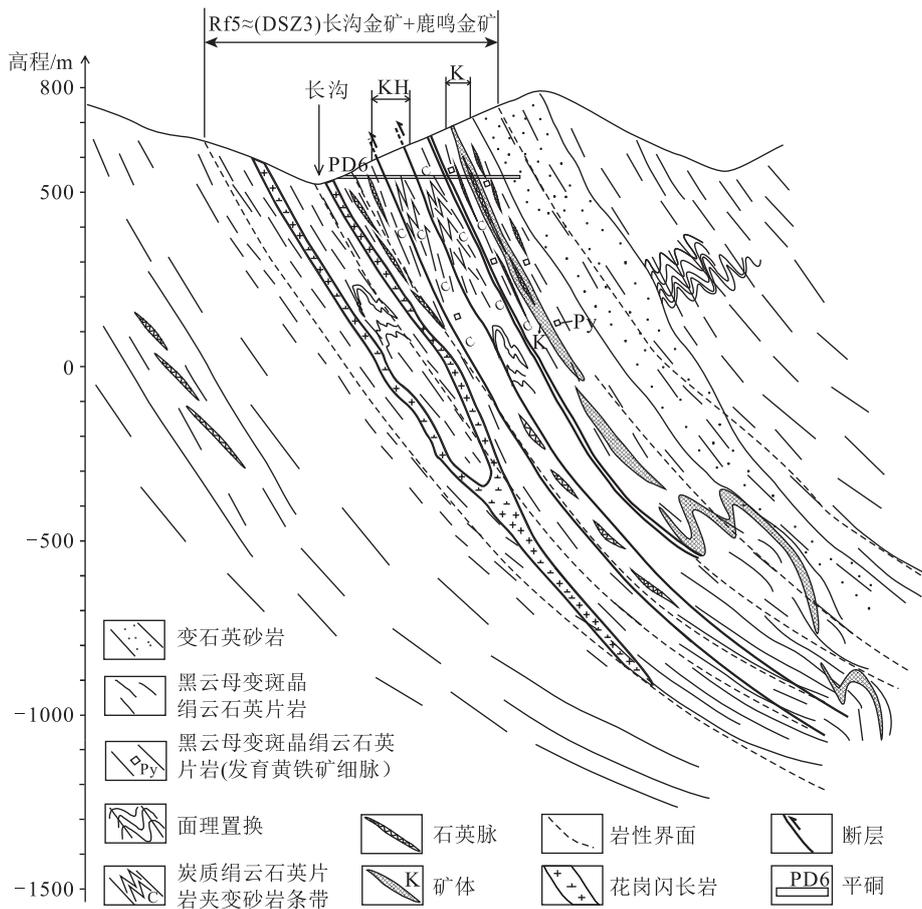


图 6 汉阴北部金矿田长沟-鹿鸣金矿床找矿预测模型

Fig. 6 Prospecting prediction model of the Changgou-Luming gold deposit, in the northern Hanying gold orefield

表 1 长沟金矿区“三位一体”找矿预测地质模型

Table 1 Geological model of "trinity" prospecting in the Changgou Changgou gold ore district

成矿地质体	主体归属大型变形构造,以燕山期(侏罗纪)陆内造山期脆-韧性剪切带 DSZ 大型变形构造为主,叠加有岩浆期后热液和热变质带、断裂破碎带、煌斑岩脉、花岗闪长岩脉等	
成矿构造及成矿结构面	成矿构造	晚印支期—燕山期陆内造山期逆冲推覆-滑脱-走滑复合构造岩片带,脆-韧性剪切带 DSZ、多期构造叠加带、断裂破碎蚀变带、岩浆期后热液叠加和热变质带
	成矿结构面	变质细砂岩与云母石英片岩界面+物理化学转换界面+次生成矿结构面,主要为新生面理+多期构造置换 S ₂ 面理+面理产状突变带+软硬岩性界面+断裂破碎带
结构类型	二元结构:大型脆-韧性剪切带 DSZ+S ₂ 面理+断裂破碎带与中低温岩浆期后热液叠加控矿模式	
成矿作用特征标志	梅子垭组-斑鸠关组变砂岩与片岩界面、变硅质岩与变泥质粉砂岩界面、含碳层段磁黄铁矿化、磁黄铁矿化、褐铁矿化等。脆-韧性剪切变形带、石英细脉、石英团块等密集发育段,黑云母变斑晶+石榴石变斑晶叠加发育段,复杂紧闭的揉皱变形带、拔丝状黄铁矿发育段、断层破碎矿化蚀变带、S ₂ 面理弯曲突变地段、岩浆期后热液和热变质叠加段	

剪切带控制的变质片岩中蚀变岩型金矿床。综合长沟金矿床产出的构造背景、控矿构造、矿化类型、成矿流体性质、成矿时代等特征,结合矿化蚀变填图成果、流体包裹体测试结果等,将其矿床成因类型划归为与燕山期陆内造山期有关的热液型金矿,矿石类型以蚀变岩型为主,石英细脉为辅。以鳞片变晶结构、片状构造、浸染状、脉状、团块状构造为主。与金矿化密切相关的围岩蚀变是硅化、黄铁矿化和黑云母化。

(4)建立了陆内造山期热液蚀变岩型金矿找矿预测模型,指出了矿田区深部左列和伸展型剪切构造控矿及深部外围找矿方向。对长沟矿区深部和东、西延找矿、外围区金矿找矿、该带同类型金矿深化研究与深部找矿预测等均具有重要示范价值或借鉴意义,对南秦岭石泉-旬阳金矿整装勘查区找矿预测具有重要的指导意义。

致谢:十分感谢中国地质科学院地质力学研究所吕古贤研究员对矿田构造和蚀变岩相填图指导帮助,感谢陕西省地质调查院王北颖、陕西地矿西安地质矿产勘查开发院有限公司杨志学、陕西地矿第一地质队有限公司赵新科、吴邦朝、邓德平等教授级高工对野外调研工作的大力支持,感谢有色金属矿产地质调查中心方维萱研究员的细致评审和宝贵修改意见。

参考文献

- [1] 吕古贤. 构造动力成岩成矿和构造物理化学研究[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 962-980.
- [2] 吕古贤, 邓军, 郭涛, 等. 玲珑-焦家式金矿构造变形岩相形迹大比

- 例尺填图与构造成矿研究[J]. 地球学报, 1998, (2): 64-73.
- [3] 杨兴科, 韩珂, 吴旭, 等. 南秦岭陆内造山构造变形特征与演化: 石泉-汉阴北部一带晚印支—燕山期构造变形分析[J]. 地质学前沿, 2016, 23(4): 72-80.
- [4] 韩珂, 杨兴科, 张健, 等. 陕南汉阴黄龙金矿脆—韧性剪切带特征及其对成矿的控制作用[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(5): 18-29.
- [5] 张康. 南秦岭汉阴北部志留系金矿田构造控矿规律及找矿标志研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2012.
- [6] 高雅宁. 南秦岭汉阴北部金矿田陆内造山期构造-岩浆-成矿规律及成矿模式研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2017.
- [7] 方维萱. 岩浆侵入构造系统 I: 构造岩相学填图技术研发与找矿预测效果[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(3): 473-506.
- [8] 王涛, 童英, 郭磊, 等. 侵入岩填图方法体系及专题研究[J]. 地质通报, 2017, 36(11): 1953-1962.
- [9] 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 秦岭造山带的结构构造[J]. 中国科学(B辑), 1995, (9): 994-1003.
- [10] 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.
- [11] 朱华平, 付静茹. 南秦岭中生代逆冲推覆构造事件与金矿的形成[J]. 地质学前沿, 2004, (1): 168.
- [12] 胡健民, 孟庆任, 白武明, 等. 南秦岭构造带中一晚古生代伸展构造作用[J]. 地质通报, 2002, (Z2): 471-477.
- [13] 董树文, 张岳桥, 李秋生, 等. 论大巴山陆内造山带[M]. 北京: 地质出版社, 2014: 1-347.
- [14] 陈虹, 胡健民, 武国利, 等. 南秦岭构造带中段晚中生代陆内变形特征与侧向挤出构造[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(6): 1906-1927.
- ①杨兴科, 何虎军, 张康, 等. 陕西省安康市汉阴北部金矿田构造与快速找矿方法研究. 长安大学, 2012.
- ②杨兴科, 何虎军, 高雅宁, 等. 陕西石泉-旬阳金矿整装勘查区重点工作区找矿预测研究总结报告. 长安大学, 2015.
- ③吴闻人, 王北颖, 冯明伸, 等. 陕西省南秦岭造山带中部韧性剪切带的形成、演化及其与金矿成矿关系研究. 陕西省地矿局, 1991.