

西秦岭甘肃夏河—合作地区与中酸性侵入岩有关 的金铜多金属成矿系统及找矿预测

李康宁¹, 贾儒雅², 李鸿睿¹, 汤磊³, 刘伯崇¹, 严康¹, 韦乐乐⁴

LI Kangning¹, JIA Ruya², LI Hongrui¹, TANG Lei³, LIU Bochong¹, YAN Kang¹, WEI Lele⁴

1. 甘肃省地质矿产勘查开发局第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050;

2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

3. 招金矿业股份有限公司, 山东 招远 265400;

4. 陕西国际商贸学院珠宝学院/陕西省宝石教学示范中心, 陕西 西安 712000

1. Third Institute of Geological and Mineral Exploration, Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 730050, Gansu, China;

2. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

3. Shandong Zhaojin Group Co., Ltd., Zhaoyuan 265400, Shandong, China;

4. Shaanxi Institute of International Trade Jewelry Institute/Shaanxi Province Gemological Teaching Demonstration Center, Xi'an 712000, Shaanxi, China

摘要:甘肃夏河—合作地区岩浆岩与矿产分布具有分带性;夏河—合作断裂以北侵入岩规模较大,以岩基、岩株为主,发育 Cu、Au、W、Mo、Pb、Zn 等以中高温元素为主的矿化,受岩体边缘接触带及断裂双重控制;夏河—合作断裂以南侵入岩规模较小,多以小岩株、脉岩出现,发育 Au、Hg、Sb 等中低温矿化,受断裂破碎带控制。地球化学组成显示,该区侵入岩具有镁闪长岩、TTG 岩套的双重特点,为“热壳”+“热幔”的壳幔结构,成矿条件极为有利。硫、氢、氧稳定同位素特征指示,成矿物质主要来自地幔岩浆析出的热液,后期有大气降水的参与。夏河—合作地区为与中酸性侵入岩有关的金铜等多金属成矿系统,在夏河—合作断裂以南,剥蚀较浅,可寻找远成低温热液型金、锑矿等,在其深部还应注意寻找斑岩型或矽卡岩型铜金矿床。而在剥蚀程度较高的北带,应以斑岩型和矽卡岩型矿床为主。

关键词:西秦岭;早子沟金矿;成矿系统;找矿预测

中图分类号:P681.51;P681.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)08-1191-13

Li K N, Jia R Y, Li H R, Tang L, Liu B C, Yan K, Wei L L. The Au-Cu polymetallic mineralization system related to intermediate to felsic intrusive rocks and the prospecting prediction in Xiahe-Hezuo area of Gansu, West Qinling orogenic belt. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(8): 1191-1203

Abstract: The distribution of magmatic rocks and mineral deposits in Xiahe-Hezuo area has a zoning characteristics: The intrusive rocks in northern Xiahe-Hezuo fault have larger scales and are mainly batholiths and stocks. The mineralization in intrusive rocks is dominated by medium and high temperature elements, such as Cu, Au, W, Mo, Pb and Zn, and is controlled jointly by the contact zone at the edge of rock mass and the fracture. The intrusive rocks to the south of Xiahe-Hezuo fault are smaller and are mainly small stocks and dikes. The mineralization in intrusive rocks is dominated by medium and low temperature elements and is controlled by the fracture.

收稿日期:2019-04-19; **修订日期:**2020-03-06

资助项目:国家重点研发计划项目课题《深部矿产资源三维找矿预测评价示范》(编号:2017YFC0601506)、甘肃省省级基础地质调查项目《甘肃玛曲—合作整装勘查区深部找矿预测》(编号:甘资财(2019)27号)和中国地质调查局项目《甘肃省夏河—合作整装勘查区金矿整装勘查区矿产调查与找矿预测》(编号:121201004000160901-60)

作者简介:李康宁(1986-),男,硕士,工程师,从事矿产地质调查与找矿预测工作。E-mail:379607468@qq.com

通讯作者:贾儒雅(1988-),男,硕士,工程师,从事岩石学、矿床学及找矿预测研究工作。E-mail:jiaruya@126.com

Geochemical characteristics in this area show that the intrusive rocks have the dual characteristics of magnesium diorite and TTG rock suite, and structurally belong to crust-mantle structure that is “thermal shell” + “thermal mantle”; therefore, the metallogenic condition in this area is extremely favorable. S, H, O and other stable isotope characteristics show that the ore-forming material was mainly derived from the hydrothermal fluid in the mantle magma and, in the later period, there occurred the participation of atmospheric precipitation. The Au-Cu polymetallic ore-forming system in Xiahe-Hezuo area was associated with medium-acid intrusive rocks. Therefore, exploration should be focused on searching for remote low temperature hydrothermal gold and antimony deposits in the shallow part and searching for porphyry and skarn deposits in the depth to the south of Xiahe-Hezuo fault, due to the shallow denudation degree. However, the prospecting should be based on porphyry and skarn deposits to the north of Xiahe-Hezuo fault characterized by a high denudation.

Key words: West Qinling orogenic belt; Zaozigou gold deposit; mineralization system; prospecting prediction

甘肃省夏河—合作地区位于西秦岭造山带中西段,属于华北板块南缘祁连—北秦岭加里东构造带和扬子板块北缘海西构造带的拼接部位,是诸多地块和造山带汇聚交接的地带^[1-3](图1-a)。三叠纪以来的印支运动,奠定了西秦岭造山带的构造格局^[4]。这一时期西秦岭构造—岩浆活动强烈,各类矿产大量产出,如德乌鲁铜矿、南办铜钼矿、早子沟金

矿、将其南梁铅锌矿等,总体上具有“北西向成带、北东向成串”的特点(图1-b)。这些岩浆岩—矿产作为壳幔物质交换的直接反映,带来了大量的深部信息,为研究西秦岭地区成矿动力学、成矿过程,揭示矿床成因,开展找矿预测提供了良好的条件。前人在研究区做了大量的工作,特别是金矿的矿床成因研究,学者们对此有不同的认识,比如对早子沟

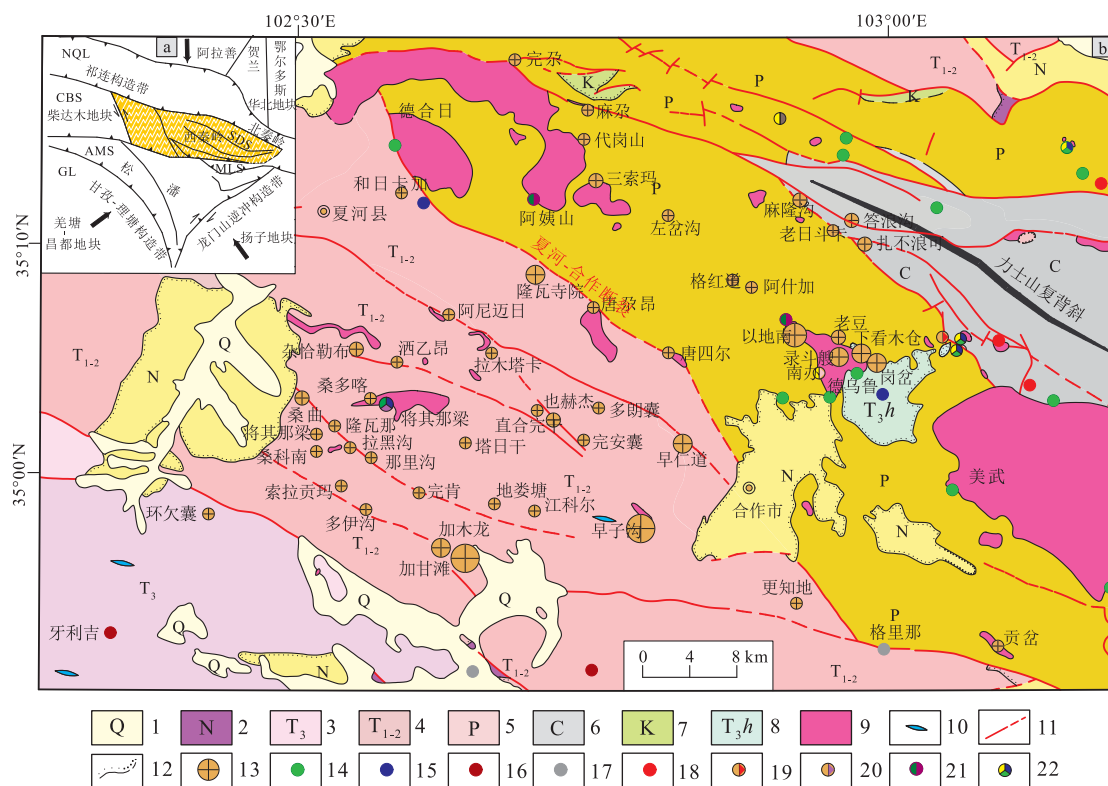


图1 夏河—合作地区地质简图(a 据参考文献[4]; b 据参考文献[5])

Fig. 1 Geological map of Xiahe-Hezuo area

- 1—第四系;2—新近系;3—上三叠统;4—中下三叠统;5—二叠系;6—石炭系;7—白垩纪玄武岩;8—三叠纪火山岩;9—印支期花岗岩;
10—中酸性脉岩;11—断裂;12—角度不整合界线;13—金矿;14—铜矿;15—铅矿;16—锑矿;17—汞矿;18—铁矿;19—铁铜矿;20—铜钼矿;
21—铜钨矿;22—多金属矿;CBS—柴北缘古缝合带;SDS—商丹古缝合带;KLS—东昆仑古缝合带;AMS—阿尼玛卿古缝合带;
NQL—北祁连缝合带;MLS—勉略古缝合带;GL—甘孜—理塘缝合带

金矿,邱昆峰等^[6]认为早子沟金成矿与造山作用有关;李建威等^[7]认为属于与还原性岩浆有关的热液成矿作用;也有学者认为属卡林型金矿^[8],造成争议的原因之一是前人很少从成矿系统角度考虑本区铜、金、砷、锑等成矿关系及其与区域岩浆作用的关系。本文通过对西秦岭夏河—合作地区与中酸性侵入岩有关的金铜等多金属成矿系统典型矿床地质地球化学特征的对比分析,探讨该多金属成矿系统形成、演化及其与区域构造—岩浆作用的关系,为区域成矿预测和进一步找矿勘查提供理论依据。

1 地质背景

研究区地层整体呈背斜构造(力士山复背斜),北西向带状展布。以夏河—合作断裂为界,以北为古生代地层,主要有石炭系、二叠系,为滨浅海相陆源碎屑岩夹碳酸盐岩建造;以南主要为三叠系,为一套半深海斜坡相细碎屑岩复理石建造。

岩浆岩呈弧形北西向展布,以石英闪长玢岩、花岗闪长岩组合为主,少量花岗斑岩、英云闪长岩分布,多呈岩株、岩脉分布,具多期脉动性。侵入岩时代集中在210~250 Ma^[9]。火山岩主要分布在合作市德乌鲁岩体东部一带,主要为偏铝质高钾钙碱性安山岩、流纹岩组合,火山碎屑物较多,安山质占比较大,化学成分与侵入岩相当,均属钙碱性系列。

区域构造线呈北西向,构造以大型断裂为主,褶皱次之。夏河—合作区域断裂带为区域的主控断裂,为区域上二叠系与三叠系的分界线,也是区域Ⅱ级构造单元的分界断裂。以此断裂为界,北东侧为中秦岭陆缘盆地,南西侧为泽库前陆盆地。该断裂规模大,变形强,呈弧形弯曲舒缓波状延伸,主断面北倾。其次一级的压性、压扭性及张扭性断裂是赋矿的有利空间,早子沟、加甘滩特大型金矿和桑曲、杂恰勒布、索拉贡玛、也赫杰、早仁道等中小型金矿都产于此断裂带中,并集中分布于该断裂带与桑科南—格里那断裂带控制的范围内。夏河—合作地区在TM影像上具有热隆构造的特征,主体为北西向延伸的椭圆形,已知所有金矿基本分布在这个环形构造内,表明其深部可能存在较大规模的隐伏岩体^①。

2 岩浆岩分带与矿化

西秦岭地区岩浆岩极发育,由北向南依次有:

同仁—临潭二叠纪—早三叠世蛇绿混杂带(隆务峡蛇绿岩250.1±2.2 Ma^[10])、同仁—合作奥长花岗岩—英云闪长岩—花岗闪长岩岩浆弧(TTG)(250~230 Ma)及其以南的花岗岩—花岗闪长岩岩浆弧(GG)(230~210 Ma)^[11-14],显示出明显的分布极性。从中国侵入岩大地构造图^[11]上可以判读出夏河—合作地区洋壳的俯冲方向,即同仁—临潭二叠纪—早三叠世蛇绿混杂带代表的洋壳板块向南俯冲。

夏河—合作地区位于同仁—合作奥长花岗岩—英云闪长岩—花岗闪长岩岩浆弧(TTG)中部,可分为2个带。北带(夏河—合作断裂以北),即铜、金、钨、钼等多金属成矿带。侵入岩出露规模较大,呈带状北西向分布,产状以岩基、岩株为主,侵入体主要有德合日岩体、阿姨山岩体、三索玛岩体、德乌鲁岩体、美武岩体等,均为杂岩体,主要岩性有花岗闪长岩、二长花岗岩、石英闪长岩等。其中阿姨山岩体及其接触带中产阿姨山铜钨矿,德乌鲁岩体及其内外接触带产有以地南铜金矿(大型)、老豆金矿、下看木仓金矿、吉利金矿、老虎山金矿及德乌鲁铜矿、岗以铜矿、南办铜钼矿,美武岩体中产峡黑建岗铁矿、上郎岗铜矿等。铜矿严格受岩体内外接触带的控制,金矿受岩体接触带和断裂构造的双重控制。矿床类型主要为热液脉型、矽卡岩型和斑岩型,矿化作用为交代和充填。南带(夏河—合作断裂以南),即Au、Hg、Sb等中低温元素成矿带。岩浆岩多以规模较小的石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩、花岗斑岩等岩脉、岩枝产出,主要有玛九勒花岗闪长岩—石英闪长岩、将其那梁花岗闪长岩、早子沟闪长玢岩—石英闪长玢岩—花岗斑岩。已知的金矿床主要有早子沟、加甘滩、隆瓦寺院、桑曲、也赫杰、直合完干、早仁道、索拉贡玛等。其他如牙利吉金锑矿点、格里那汞矿点等分布于桑科南—格里那断裂带以南。南带的Au、Hg、Sb矿化成矿条件类似,均受断裂构造控制。矿床类型主要为远成低温热液型,矿化作用以充填为主,交代次之。

3 典型矿床地质特征

3.1 以地南铜金矿

以地南铜金矿是夏河—合作断裂以北与中酸性侵入岩有关的金矿的典型代表,兼具矽卡岩型、中低温岩浆热液型特征。该矿床位于力士山—新

堡复背斜的次级褶皱日加—上郎岗向斜的南西翼,总体为单斜构造。在矿区的北西、南东侧出露下二叠统大关山群上部岩组的滨海—台缘斜坡—深海盆地相沉积,岩性以碎屑岩为主,夹少量碳酸盐岩(图2)。

矿区中部出露大面积石英闪长岩体,为德乌鲁岩体的一部分,岩体中侵入有闪长玢岩脉,石英、方解石脉较发育。石英闪长岩呈灰白色,不等粒半自形粒状结构,块状构造,主要矿物成分为角闪石(25%)、中性斜长石(45%)、石英(20%)和黑云母(5%),金属矿物含量约5%。闪长玢岩呈岩墙或岩枝贯入岩体或围岩中,分布在岩体内的闪长玢岩脉局部见黄铁矿化及金矿化,而分布在地层中的闪长玢岩脉常见铜矿化、黄铁矿化及金矿化。

断裂构造主要分为2类。一类是北西—南东走向,北东方向倾伏,主要发育在炭质板岩和岩体接触部位,有2种表现形式:一为与金矿化有密切关系的闪长玢岩脉沿板岩劈理方向贯入,产状较缓,主要控制Au矿化;二为德乌鲁岩体与炭质板岩在西南接触带的角岩带,亦为北西—南东走向,该类断裂产状受接触带控制而变陡,在该区主要控制Cu—Au矿化和Pb—Zn矿化。另一类是南北走向,倾角较陡,产状变化明显,总体向东倾,局部向西倾,该类断裂主要发育在德乌鲁岩体内,其控制着浅部Cu—Au矿化和深部的Pb—Zn矿化。

围岩蚀变主要有硅化、黄铁矿化、赤—褐铁矿化、碳酸盐化、绢云母化、绿泥石化、高岭土化等。

以地南铜金矿可以划分为岩浆成矿期、热液成矿期和表生成矿期3个期次^[15]。岩浆成矿期与德乌鲁岩体侵位同时或略晚,严格受接触带构造控制,发育矽卡岩化、石英—绢云母角岩化,主要矿物为黄铜矿、辉铜矿、黄铁矿、毒砂。热液成矿期与金成矿关系最密切,从早到晚可划分为6个成矿阶段:①钾化阶段,伴随着钾长石化,有少量磁铁矿生成;②早期电气石化,以围岩中广泛发育的电气石为标志;③黄铁绢云母化阶段,生成较多的黄铁矿和毒砂,是金的主要成矿阶段;④石英—电气石化阶段,主要矿物组合为电气石—毒砂—黄铁矿,少量辉锑铁矿、斜方砷铁矿;⑤石英—辉锑矿化

阶段,表现为石英—辉锑矿脉的大量发育,亦见黄铁矿、毒砂;⑥碳酸盐化阶段,晚期张性方解石穿插早期各阶段蚀变矿物,常伴生黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等金属硫化物。

3.2 早子沟金矿

早子沟金矿是夏河—合作断裂以南与中酸性脉岩有关的金矿的典型代表。矿区出露地层简单,主要为中三叠世古浪堤组下段,主要为一套钙质、粉砂质、泥质细碎屑岩。早子沟矿区分布许多呈脉状产出的中酸性侵入岩,岩脉单体规模不大,产出集中(图3)。岩性主要为石英闪长玢岩、石英黑云闪长玢岩、花岗斑岩等,均为浅成侵入体。矿区不同方向的断裂构造十分发育,这些断裂相互交叉,具多期次活动的特点。矿体和脉岩的分布均受控于断裂构造。断裂按走向不同,大致分为近东西向、近南北向、北东向、北西向及北北东向5组,其中北东向、近南北向、北西向3组断裂为矿区主要的控矿断裂,分别控制着矿区北东向、近南北向、北西向成矿带^[16]。

早子沟金矿以金矿石为主,少量金锑矿石。矿石结构主要为自形—半自形晶、他形晶粒状、碎裂、交代残余、包含、假象结构等。矿石构造有星散浸染状、脉状、细脉浸染状、块状构造等。矿石的矿物组成相对简单,金属矿物主要有自然金、黄铁矿、毒砂、辉锑矿,少量雄黄、雌黄、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿等;非金属矿物主要有石英、长石、绢云母、方解石,其次还有高岭石、黑云母、角闪石、白云母、绿泥石等。主要载金矿物为石英、黄铁矿、毒砂及辉锑矿。

矿区围岩蚀变以硅化、黄铁矿化、毒砂化、绢云母化、碳酸盐化、绿泥石化、高岭土化等中低温热液蚀变为主,局部粉砂质板岩中见角岩化。围岩蚀变围绕矿脉发生,沿断裂破碎带分布,受断裂构造控制作用明显;其中硅化、黄铁矿化、毒砂化与金成矿作用关系密切;蚀变作用的空间分带不明显,从矿脉向两侧围岩大体可划分为硅化→绢云母化→碳酸盐化。

早子沟金矿可以划分为热液成矿期和表生成矿期2个成矿期次。热液成矿期从早到晚可划分为硅化、硅化—黄铁矿—毒砂、石英—辉锑矿及石英—方解石4个阶段。其中硅化—黄铁矿—毒砂和石英—

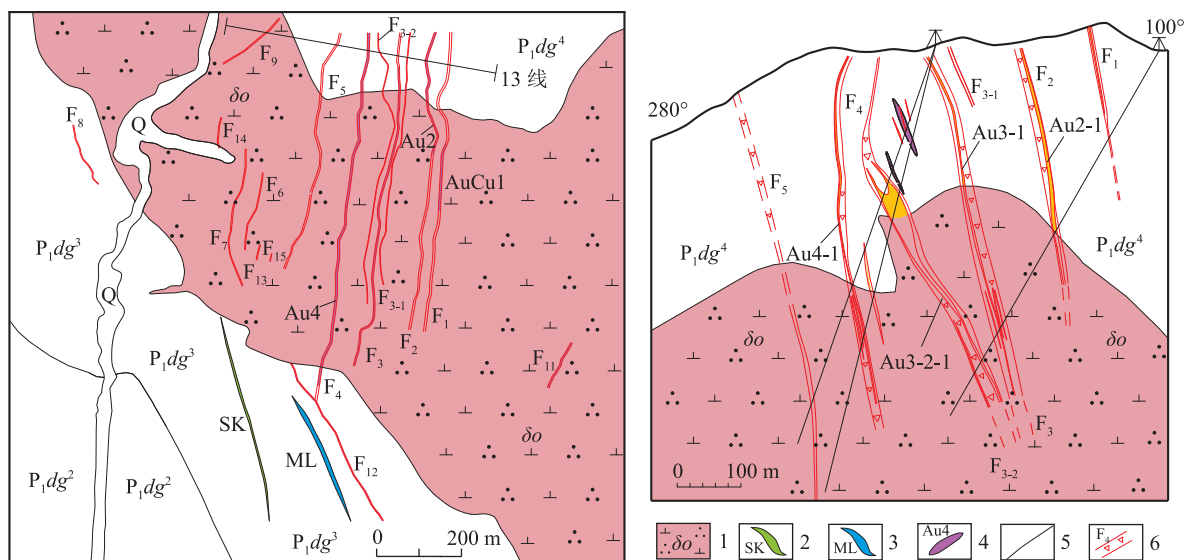


图 2 以地南铜金矿地质图及 13 勘查线剖面图(据参考文献②修改)

Fig. 2 Geological map of the Yidinan Cu-Au deposit and geological section along No.13 exploration line

1—石英闪长岩;2—砂卡岩;3—大理岩;4—矿体及编号;5—地质界线;6—断层破碎蚀变带及编号;Q—第四系;

P_1dg^4 —下二叠统大关山组四段; P_1dg^3 —下二叠统大关山组三段; P_1dg^2 —下二叠统大关山组二段

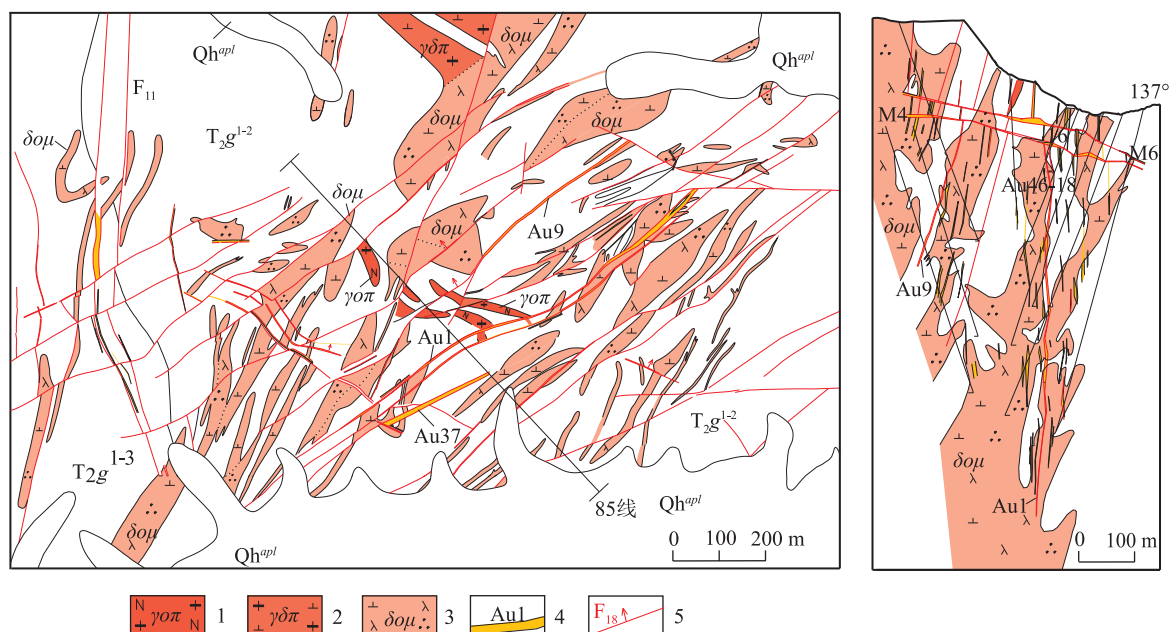


图 3 早子沟金矿地质图及 85 勘查线剖面图(据参考文献③修改)

Fig. 3 Geological map of the Zaozigou gold deposit and geological section along No.85 exploration line

1—斜长花岗斑岩;2—花岗闪长斑岩;3—石英闪长岩;4—金矿体及编号;5—断裂及编号;Qh^{apl}—第四系冲洪积物;

T_{2g}^{1-3} —中三叠世古浪堤组一段第三岩性段; T_{2g}^{1-2} —中三叠世古浪堤组一段第二岩性段

辉锑矿-方解石阶段分别为主要和较主要成矿阶段。硅化阶段主要表现为面状硅化,沿原岩的胶结物与杂基进行交代,形成他形细粒石英,还有少量

立方体粒状黄铁矿,金矿化极微弱。硅化-黄铁矿-毒砂阶段受断裂破碎带控制,呈带状分布,宽数米,主要矿物组合为含砷黄铁矿、毒砂、石英、绢云母、

白云母等。含砷黄铁矿为他形粒状和五角十二面体晶形,主要呈浸染状分布,部分以集合体形式分布于石英细脉边部或以石英包裹体形式存在,是最主要的载金矿物。毒砂呈毛发状、针状。石英-辉锑矿阶段辉锑矿矿化主要呈脉状沿张性断裂分布。石英-方解石阶段以碳酸盐矿物为主,多沿后期张性断裂呈脉状分布,脉内较纯净。

4 成岩成矿地球化学特征

4.1 岩浆岩地球化学特征

夏河—合作地区主要侵入岩的主量元素组成及特征参数见表1。在侵入岩 TAS 图解上,样品多数属花岗闪长岩,少数为闪长岩和花岗岩(图4)。总体具有富钾、富镁的特点,均属高钾钙碱性-钙碱性系列(图5)。

在 SiO_2 - MgO 图解(图6-a)、 FeO^*/MgO - SiO_2 图解(图6-b)中,早子沟金矿含矿脉岩与西秦岭夏河—合作地区主要侵入岩一样,均属于低铁钙碱性(LF-CA)镁闪长岩(MA)。镁闪长岩一般认为产于洋俯冲带上面的弧盆系内,是俯冲洋壳脱水熔融产生的岩浆与上覆楔形地幔发生相互作用形成的产物^[19]。在 TTG 岩套标准矿物 An-Ab-Or 判别图解(图7)上,夏河—合作侵入岩样品点主要落在花岗闪长岩与二长花岗岩区域,但也有不少样品

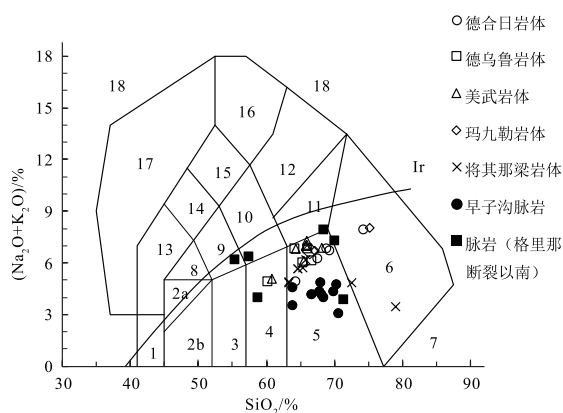


图4 侵入岩 TAS 分类图解^[17]

Fig. 4 TAS classification diagram of intrusions

1—橄榄辉长岩;2a—碱性辉长岩;2b—亚碱性辉长岩;3—辉长闪长岩;
4—闪长岩;5—花岗闪长岩;6—花岗岩;7—石英岩;8—二长辉长岩;
9—二长闪长岩;10—二长岩;11—石英二长岩;12—正长岩;
13—副长石辉长岩;14—副长石二长闪长岩;15—副长石二长正长岩;
16—副长正长岩;17—副长深成岩;18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩;
Ir 为分界线,上方为碱性,下方为亚碱性

点落在英云闪长岩-奥长花岗岩区域,说明夏河—合作地区存在 TTG 岩套。

区域上,麦秀—甘加—德乌鲁一带的安山岩均为高镁安山岩-镁安山岩^[22],与相邻侵入体一起,构成镁安山岩(闪长岩)-高镁安山岩(闪长岩)-TTG 岩套组合。该组合指示,夏河—合作地区的壳幔结构为热的年轻的洋壳+上覆热的软流圈地幔楔^[20]。这样的“热壳”和“热幔”结构岩浆源区多,岩浆种类最丰富,岩浆组合多样,岩浆活动最强烈,对成矿作用最有利,提供了良好的深部地质背景,是造就岩浆弧有关的铜-金-钼、铜-镍等大型、超大型矿床群集的有利构造部位^[20, 23]。

4.2 矿床同位素特征

(1) 硫稳定同位素

夏河—合作地区金矿的形成与黄铁矿、毒砂、辉锑矿等硫化物密切相关,硫化物硫同位素组成特征对于判断金的来源具有重要意义。本次测定了加甘滩金矿中黄铁矿、毒砂的硫同位素,并收集了老豆金矿、以地南铜金矿、早子沟金矿、加甘滩金矿典型矿床的硫同位素数据(表2)。

可以看出,研究区矿床中的 $\delta^{34}\text{S}$ 具有北高南低的特点,夏河—合作断裂以北位于岩体中的矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 普遍较高,且以正值为主,变化范围较窄($-5.9\text{‰} \sim 5\text{‰}$),平均值在 0 左右,为深源岩浆硫或幔源硫。夏河—合作断裂以南的早子沟、加甘滩金矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 均为负值,但 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较窄,硫同位素组成较稳定。更低的负值可能与后期的沉积围岩物质交换及大气降水参与有关。本次对早子沟含矿黄铁

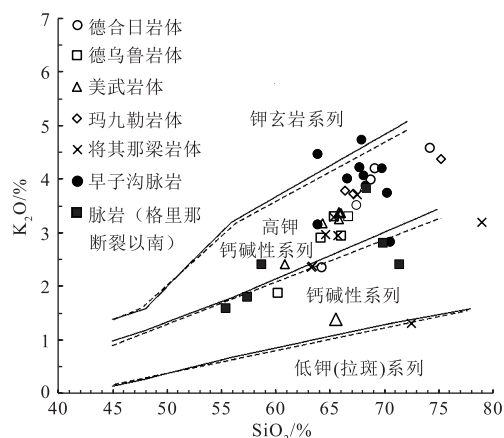


图5 岩浆系列 SiO_2 - K_2O 判别图解^[18]

Fig. 5 SiO_2 - K_2O diagram of magma series

表 1 夏河—合作地区主要侵入岩主量元素及相关参数

Table 1 The content of major elements and main parameters of intrusions in Xiahe-Hezuo area																	%
地点	样号	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	总计	Na ₂ O+K ₂ O	FeO*/MgO	数据来源
德合日岩体	PM048-1-1	花岗闪长岩	62.71	0.66	15.75	0.69	4.33	0.09	3.38	4.95	2.5	2.28	0.12	97.46	4.78	1.46	④
	PM048-3-1	花岗闪长岩	67.74	0.53	15.72	0.2	3	0.04	1.01	3.24	2.8	3.9	0.19	98.37	6.70	3.15	
	PM048-6-1	花岗闪长岩	66.32	0.6	16.42	0.49	3.2	0.06	1.2	3.6	2.7	3.44	0.19	98.22	6.14	3.03	
	PM048-10-1	花岗闪长岩	73.42	0.18	14.49	0.09	1.05	0.02	0.29	1.35	3.3	4.5	0.1	98.79	7.80	3.90	
	PM048-12-1	似斑状花岗闪长岩	68.37	0.6	15.34	0.39	3.12	0.04	0.96	3.09	2.52	4.12	0.19	98.74	6.64	3.62	
德乌鲁岩体	DW-1	石英闪长岩	58.6	0.74	14.86	0.44	6.29	0.11	5.31	5.94	2.98	1.8	0.15	97.22	4.78	1.26	⑤
	DW-2	石英闪长岩	63.16	0.61	14.48	0.55	4.55	0.08	3.81	4.32	3.86	2.84	0.14	98.40	6.70	1.32	
	DW-3	石英二长闪长岩	64.6	0.57	14.72	0.56	4.39	0.08	3.54	4.25	2.69	3.24	0.12	98.76	5.93	1.38	
	DW-4	石英二长闪长岩	65.15	0.52	14.23	0.63	3.89	0.08	3.3	3.96	3.86	2.88	0.12	98.62	6.74	1.35	
	DW-5	花岗闪长岩	65.96	0.5	14.51	0.59	3.87	0.07	3.24	3.99	2.78	3.25	0.1	98.86	6.03	1.36	
美武岩体	MW-1	石英闪长岩	64.87	0.55	14.85	0.86	3.51	0.07	2.74	3.7	3.86	3.31	0.14	98.46	7.17	1.56	⑤
	MW-2	二长花岗岩	67.02	0.52	14	1.1	3.35	0.08	2.26	3.06	2.95	3.79	0.17	98.30	6.74	1.92	
	MW-3	花岗闪长岩	64.37	0.6	14.99	0.26	2.05	0.06	2.9	6.81	4.66	1.36	0.16	98.22	6.02	0.79	
	MW-4	花岗闪长岩	66.46	1.05	18.9	2.46	4.37	0.22	4.56	5.65	2.89	2.64	0.12	109.32	5.53	1.44	
	MW-5	石英闪长岩	65.26	0.37	15.84	0.4	3.38	0.09	2.74	4.04	3.56	3.36	0.13	99.17	6.92	1.36	
	MW-6	石英闪长岩	65.14	0.33	15.91	0.73	3.04	0.09	2.73	4	3.67	3.22	0.13	98.99	6.89	1.35	
	MW-7	石英闪长岩	65.12	0.32	15.84	0.58	3.15	0.08	2.8	3.74	3.66	3.31	0.13	98.73	6.97	1.31	
	MW-8	石英闪长岩	63.58	0.36	16.03	0.11	3.97	0.09	3.35	4.51	3.58	3.13	0.12	98.83	6.71	1.21	
玛久勒岩体	MJ-1	黑云母花岗闪长岩	65.31	0.62	16.76	0.07	3.18	0.05	1.75	4.01	2.84	3.73	0.14	98.46	6.57	1.85	⑤
	MJ-2	蚀变花岗斑岩	74.58	0.05	14.7	0.2	0.56	0.03	0.09	1.02	3.61	4.33	0.03	99.20	7.94	8.22	
	MJ-3	二长花岗岩	65.68	0.56	16.48	0.16	2.98	0.05	1.68	3.59	2.93	3.65	0.13	97.89	6.58	1.86	

续表 1

地点	样号	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	总计	Na ₂ O+K ₂ O	FeO*/MgO	数据来源
将其那梁岩体	JQ-1	石英闪长玢岩	62.99	0.6	16.14	4.06		0.08	0.75	4.58	0.49	3.46	0.109	93.26	3.95	4.87	⑥
	JQ-2	石英闪长玢岩	59.94	0.57	15.72	5.07		0.1	4.2	4.28	2.38	2.24	0.099	94.60	4.62	1.09	
	JQ-3	花岗斑岩	76.08	0.16	12.01	2.27		0.07	0.67	1.73	0.24	3.08	0.029	96.34	3.32	3.05	
	JQ-4	石英闪长玢岩	60.4	0.62	16.08	4.99		0.09	4	4.53	2.41	2.24	0.108	95.47	4.65	1.12	
	JQ-5	花岗斑岩	71.29	0.61	13.2	4.9		0.15	1.34	1.95	3.51	1.28	0.137	98.37	4.79	3.29	
	JQ-6	闪长玢岩	60.17	0.54	15.75	4.14		0.12	1.73	4.29	2.26	3.03	0.106	92.14	5.29	2.15	
	JQ-7	黑云石英闪长玢岩	63.02	0.57	16.69	4.75		0.1	2.33	4.45	2.63	2.89	0.105	97.54	5.52	1.83	
	JQ-8	闪长玢岩	64.29	0.54	16.74	4.3		0.09	1.96	3.68	3.18	2.87	0.104	97.75	6.05	1.97	
早子沟脉岩	2011Ⅱ1QH-6	闪长玢岩型矿石	63.26	0.513	16.19	2.80	0.83	0.046	1.78	3.29	0.112	3.57	0.11	92.50	3.68	1.88	[16]
	2011Ⅱ1QH-7	闪长玢岩型矿石	57.82	0.552	14.55	2.72	1.63	0.058	3.14	5.74	0.125	4.02	0.099	90.45	4.15	1.30	
	2011Ⅱ1QH-8	闪长玢岩	57.65	0.553	15.17	3.36	1.31	0.064	3.67	5.21	0.318	2.83	0.095	90.23	3.15	1.18	
	2011Ⅱ1QH-9	闪长玢岩	64.41	0.465	14.84	2.12	0.97	0.038	1.85	3.71	0.195	2.57	0.111	91.28	2.77	1.56	
	2011Ⅱ1QH-10	闪长玢岩型矿石	65.55	0.454	14.62	1.84	1.22	0.036	1.62	3.34	0.936	3.47	0.103	93.19	4.41	1.78	
	11VIYQ-6	石英闪长玢岩	62.68	0.57	15.81	1	2.65	0.05	1.72	3.52	0.096	3.72	0.11	91.93	3.82	2.06	
	11VIYQ-9	石英闪长玢岩	63.29	0.46	13.96	1.05	1.82	0.05	2.1	3.88	0.11	3.78	0.08	90.58	3.89	1.32	
	11VIYQ-10	石英闪长玢岩	60.7	0.5	14.7	0.96	2.18	0.05	1.9	4.57	0.093	3.76	0.08	89.49	3.85	1.60	
	11VIYQ-7	闪长岩	60.09	0.58	16.43	1.63	0.91	0.05	1.98	4.66	0.13	3.59	0.1	90.15	3.72	1.20	
	11VIYQ-8	闪长岩	63.24	0.6	16.65	0.67	3.01	0.05	1.7	2.43	0.13	4.39	0.1	92.97	4.52	2.13	
脉岩(格里那断裂以南)	2017XVIYQ-1	闪长玢岩	55.14	0.806	17.22	6.01	5.19	0.082	4.84	3.78	4.56	1.56	0.266	99.45	6.12	2.19	本文
	2017XVIYQ-2	闪长玢岩	68.42	0.475	15.28	3.44	0.45	0.042	0.772	1.66	4.38	2.72	0.129	97.77	7.10	4.59	
	2017XVIYQ-3	闪长玢岩	67.8	0.462	15.08	3.3	1.73	0.036	1.02	1.62	4.1	3.76	0.12	99.03	7.86	4.61	
	2017XVIYQ-4	石英闪长玢岩	65.17	0.52	12.38	3.05	0.71	0.107	0.107	5.50	1.37	2.18	0.151	91.24	3.55	32.28	
	S98-2	闪长玢岩	50.08	0.53	9.39	4.93	1.62	0.15	2.18	12.87	1.36	2.04	0.1	85.25	3.40	2.78	
	Ⅲ-10-1	闪长玢岩	53.56	0.75	14.55	2.23	3.89	0.09	6.99	4.75	4.26	1.65	0.52	93.24	5.91	0.84	

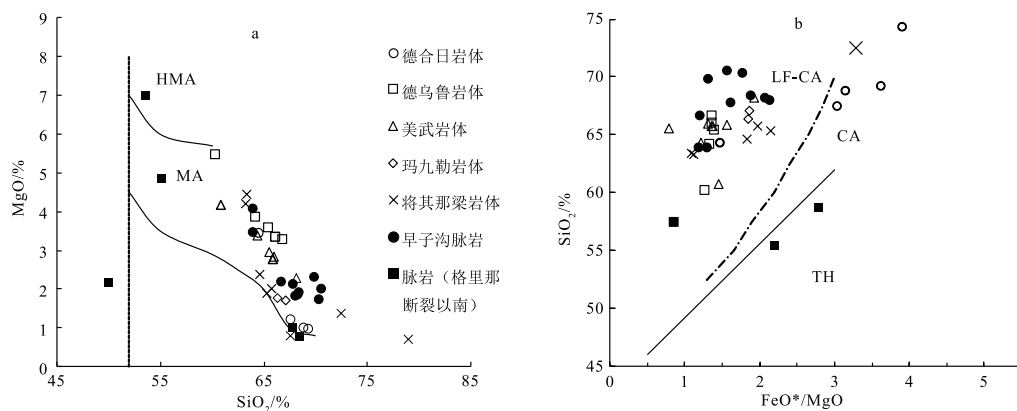


图 6 夏河—合作地区镁闪长岩判别图^[19-20]

Fig. 6 MA discriminant diagram of intrusions in Xiahe-Hezuo area

矿进行了原位硫测试, $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-1.5\text{‰} \sim -2.9\text{‰}$, 表现出幔源或岩浆硫的特点, 说明研究区各个矿床金的物质来源具有统一性。

(2) 氢-氧稳定同位素

成矿流体的主要成分为水, 其来源可以反映成矿物质的来源。本次测定了以地南铜金矿、加甘滩金矿矿体中石英的氢-氧同位素组成, 并收集

了老豆金矿、早子沟金矿的氢-氧同位素数据(表 3)。老豆金矿中绢云母的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 δD 组成位于岩浆水范围 ($\delta\text{D} = -80\text{‰} \sim -40\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 5.5\text{‰} \sim 10\text{‰}$ ^[30])。而老豆金矿电气石及其他矿床的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 δD 组成只有少部分为岩浆水, 绝大部分低于岩浆水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 δD 组成, 可能与后期大气降水的混入有关。

表 2 夏河—合作地区典型矿床硫稳定同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值

Table 2 The sulfur stable isotope $\delta^{34}\text{S}$ values of typical deposits in Xiahe-Hezuo area

测试对象	黄铁矿/‰		毒砂/‰		辉锑矿/‰		数据来源
老豆金矿	-5.9~2.9	平均-2.48	-5.9~3.2	平均-4.87	2.9~5.0	平均 4.81	[15]
以地南铜金矿	2.2~4.9	平均 3.86	-3.8~7.1	平均 2.33	2.8~4.6	平均 3.7	
早子沟金矿	-9.3~-5	平均-7.4	-10.1~-5.72	平均-8.89	-12.3~-7	平均-10.1	[24-25]
早子沟金矿含金黄铁矿	-1.5~-2.9	平均-2.2					本文
加甘滩金矿	-12.5~-7.5	平均-10	-13.4	平均-13.4			

注: 测试单位为核工业北京地质研究院分析测试研究中心; 测试仪器为 Delta v plus 气体同位素质谱计; 精度优于 0.2‰

表 3 夏河—合作地区典型矿床 H-O 稳定同位素组成

Table 3 The sulfur stable isotope H-O values of typical deposits in Xiahe-Hezuo area

	测试对象	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$		$\delta\text{D}/\text{‰}$		数据来源
老豆金矿	绢云母	3.5~7.3	平均 4.8	-88.4~-65.1	平均-75.8	[26]
	电气石	-1.45~0.85	平均-0.33	-70.1~-55.3	平均-66.2	
以地南铜金矿	石英	15.5~15.4	平均 15.4	-87.6~-85.8	平均-86.7	本文
早子沟金矿	石英	6.1~12.1	平均 9.16	-103.4~-67.4	平均-94.5	[27-29]
加甘滩金矿	石英	9~11.4	平均 9.8	-99.9~-93.7	平均-96.7	本文

注: 测试单位为中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室; 测试仪器为 Delta V Advantage; 精度: H 为 2‰、O 为 0.2‰

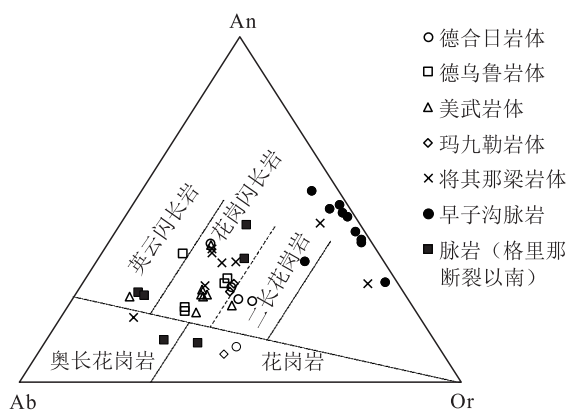
图 7 TTG 岩套 An-Ab-Or 判别图解^[21]

Fig. 7 An-Ab-Or classification diagram of TTG

5 讨论

5.1 成矿系统

Zhang 等^[31]、Meng 等^[32] 和 Li 等^[33] 认为, 华北板块与扬子板块在秦岭地区可能于中三叠世末期发生初始碰撞, 中三叠世, 西秦岭地区的洋壳仍处于俯冲阶段, 导致西秦岭印支早期岛弧岩浆岩的侵位。本次研究的夏河—合作地区与中酸性侵入岩有关的金铜等多金属矿成矿系统正是在这种地球动力学背景之下形成的(图 8、图 9)。

深部地幔成矿物质伴随着构造-岩浆活动, 沿构造有利部位先侵入到地表的一定位置, 形成较早期的德乌鲁石英闪长岩、阿姨山花岗闪长岩等镁闪长岩; 随着岩体的固结, 由于收缩应力及构造应力的作用, 形成的节理、裂隙加剧了构造空间的形成, 在区域构造和岩浆活动形成的地壳浅部热力环境下, 热泉、下渗水及各种形式的封存水, 在热能的驱动下对流循环, 萃取岩浆中的成矿物质, 形成含金的地下热液。这些含金热液从深部向地表上升过程中, 压力不断降低, 引起流体沸腾, 使围岩发生机械破碎, 形成气液角砾岩(老豆金矿); 当含金沸腾热液运移至近地表较冷的控矿断裂构造及岩石裂隙中时, 形成气液相共存的凝析流体, 与在地表的游离氧作用, 形成硫酸盐溶液, 围岩遭受广泛的酸淋滤, 析出大量 Fe^{2+} 加入溶液中, 成矿溶液中的金络合物被还原成独立金, 并呈多阶段富集成矿。

在夏河—合作弧岩浆活动带, 俯冲消减诱发的中酸性岩浆侵位于晚古生代—中生代沉积岩系。由于岩体侵位深度、围岩性质及控矿构造样式的差异, 形成属于同一成矿系统但成因类型不同的矿床, 在中酸性岩体与二叠系碳酸盐岩的接触带附近, 通过接触交代作用形成矽卡岩及其相关的金铜多金属矿床(德乌鲁铜矿、南办铜矿、以地南铜金矿); 当岩体侵入二叠系细碎屑岩时, 在岩体顶部(边部)、接触带及其附近角岩中形成斑岩型铜钼、

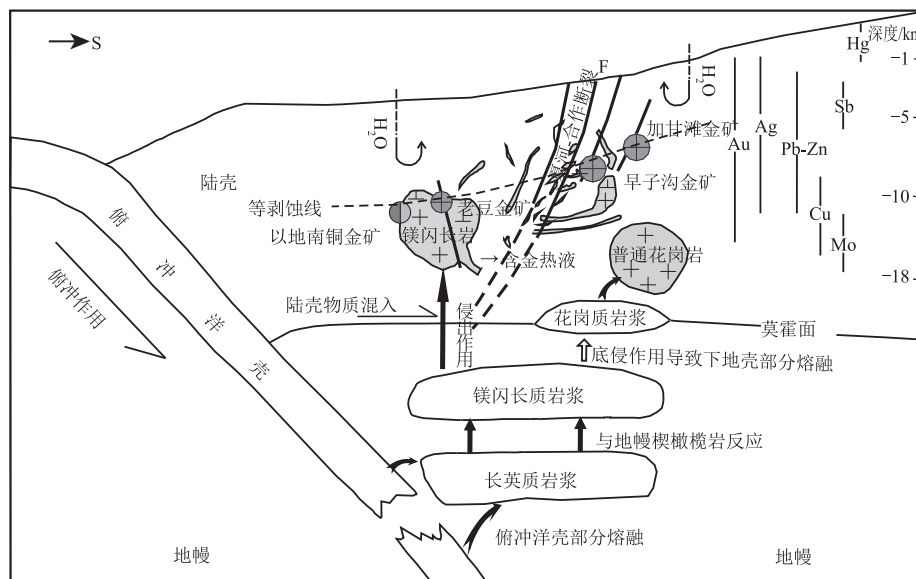


图 8 夏河—合作地区岩浆演化与成矿示意图(据参考文献[19-20,34]修改)

Fig. 8 Schematic diagram of magma evolution and mineralization in Xiahe-Hezuo area

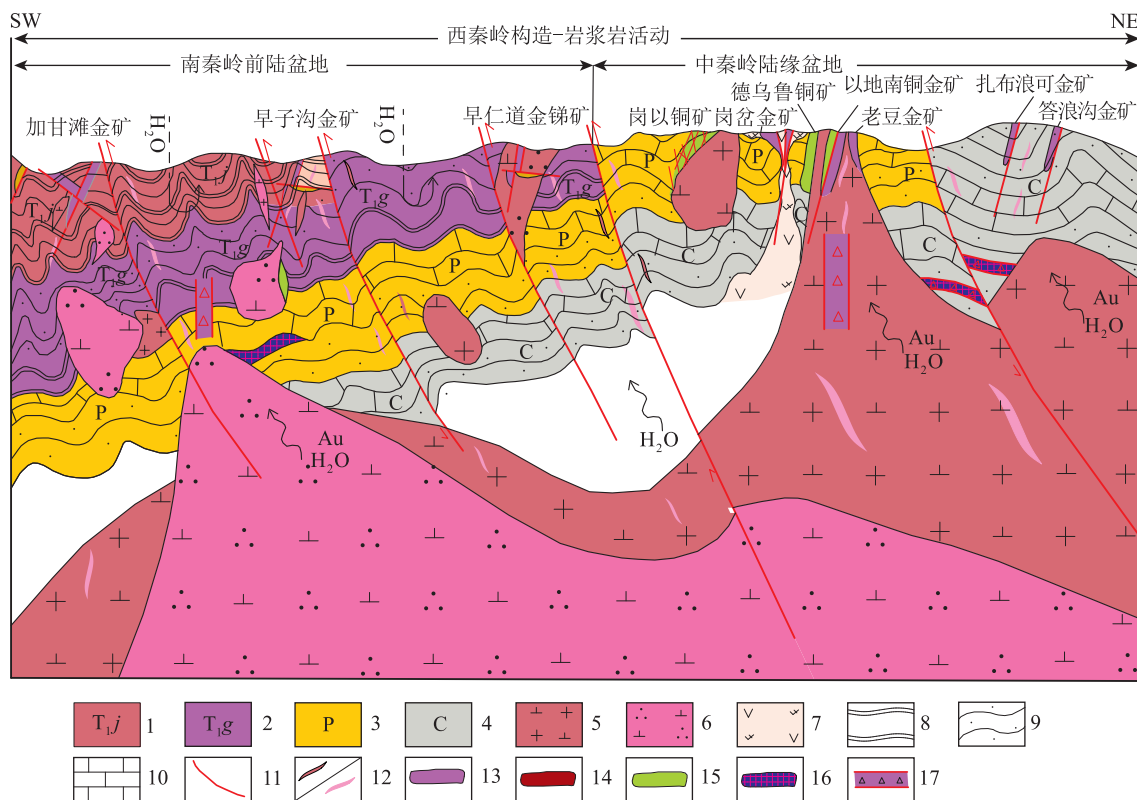


图 9 夏河—合作地区区域成矿模式图

Fig. 9 Schematic diagram of the metallogenic model for Xiahe-Hezuo area

1—早三叠世江里沟组;2—早三叠世果木沟组;3—二叠系;4—石炭系;5—印支早期侵入体;

6—印支晚期侵入体(金成矿地质体);7—火山岩;8—板岩;9—砂岩;10—灰岩;11—断裂;

12—印支早期脉岩/印支晚期脉岩;13—金矿;14—铋矿;15—铜矿;16—铅锌银多金属矿;17—角砾岩型金矿

铜钨、铜铅锌矿床(年木耳铜矿、龙得岗铜矿、兴时沟铜钼矿);岩浆热液在中酸性岩体顶部、边部及接触带附近围岩中交代,形成矽卡岩、斑岩型金、铜、钨、钼矿化,与此同时或稍晚,又叠加了受断裂破碎带控制的远成低温热液型金矿化。岩浆热液沿高角度的断裂破碎带上升,运移到距侵入体较远的部位,通过萃取赋矿岩浆中的成矿物质并沿开放的高角度断裂和裂隙系统充填、交代,在地层中形成脉状远成低温热液金矿床(早子沟金矿、加甘滩金矿)。在这一与中酸性侵入岩有关的金铜等多金属矿成矿系统中,成矿流体及其所携带的金属和 S、H-O 等组分主要来自岩浆及其气水热液。矿化元素组合由深部向浅部、由近源向远源,大致呈现出 Cu(Pb、Zn)、Cu-Au、Au-Sb、Au-Hg-As 的分带。

5.2 找矿预测

以张旗等^[35]为代表的学者曾提出以 Sr、Y 等元素含量和比值为主要判别标准的中酸性侵入岩成

因分类方案,认为其代表了不同深度背景源区熔融,并认为其中的埃达克型侵入岩与金铜矿、喜马拉雅型侵入岩与金矿成矿有关。近年来不少学者附议这种立论^[36-37]。徐学义等^[38]研究认为,西秦岭阿姨山、德乌鲁等花岗质侵入体,均属埃达克岩或喜马拉雅型花岗岩,应重点围绕埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩开展地质找矿工作,前者注意金铜矿床的寻找,后者注意金矿床的寻找。

实际上,本区多个产出金铜矿床的岩体并非埃达克岩,且夏河-合作断裂以南的多数金矿、锑矿等周围并未发现岩体(加甘滩超大型金矿、牙利吉金锑矿)。造成斑岩型、矽卡岩型金铜矿和低温热液型金矿南北分布差异性特征的,更可能是产出于成矿地质体不同位置的区域成矿模式。在北部侵入岩体多以较大规模的侵入岩基产出,在中部三叠系中则多以小岩体、岩株和大量脉岩出现,表明在北部成矿地质体多已出露地表甚至遭到剥蚀,而南部

成矿地质体可能存在于深部。由于 Cu 的成矿温度较高,所以 Cu 基本都脱离不了岩体内外接触带,而 Au 可以跟随成矿流体运移到较远的部位成矿。

因此,对于夏河—合作断裂以南的加甘滩—早子沟一带低温热液蚀变岩型金矿来说,其深部存在隐伏的成矿地质体,从浅部到深部可能存在一套低温热液蚀变岩—构造充填石英脉型—直立水压裂隙石英脉—爆破角砾岩—矽卡岩型—斑岩型的矿化类型。在加甘滩—早子沟一带锑金成矿带及其以南覆盖区,存在较大的找矿空间,注意寻找远成低温热液蚀变岩型金(锑、汞)矿,另外在已知矿床深部(早子沟金矿等),注意寻找矽卡岩型、斑岩型铜金矿;而对于北部三索玛—老豆—德乌鲁金铜成矿带来说,发育在成矿地质体顶部的一系列矿化样式已经遭到剥蚀,深部找矿应以斑岩型和矽卡岩型矿床为主。

6 结 论

(1)夏河—合作地区弧岩浆地球化学组成显示出镁闪长岩的特点,部分属于 TTG 岩套,反映出该区具有“热壳”+“热幔”的壳幔结构,具有形成大型、超大型矿集区的有利条件。

(2)夏河—合作地区与中酸性侵入岩有关的金铜等多金属成矿系统,是在印支期隆务峡蛇绿岩所代表的洋向秦岭板块俯冲消减的构造岩浆活动背景下形成的。夏河—合作断裂以北发育 Cu、Au、W、Mo、Pb、Zn 等以中高温元素为主的矿化,矿化受岩体边缘接触带及不同方向断层交会部位控制,并可能存在远成低温热液型金矿化的套合或叠加。夏河—合作断裂以南发育 Au、Hg、Sb 等中低温矿化,主要受断裂破碎带控制。

(3)矿床形成后的构造运动和抬升剥蚀等,对矿体的保存和变化具有重要影响。在夏河—合作断裂以南剥蚀量不大或其上有少量地层覆盖的区域,具备远成低温热液型金、锑等矿床的保存条件,在其深部还应注意寻找斑岩型或矽卡岩型铜金矿床。在剥蚀程度较高的北带,远成低温热液型矿床可能难以保存,但深部斑岩型和矽卡岩型矿床仍具有较好的找矿前景。

致谢:感谢中国地质调查局发展研究中心程志中研究员及其团队在工作中给予的帮助,感谢中国地质大学(北京)邱坤峰副教授及审稿专家提出的

宝贵修改意见。

参考文献

- [1] 任纪舜,张正坤,牛宝贵,等.论秦岭造山带—中朝与扬子陆块的拼合过程[C]//叶连俊,钱祥麟,张国伟.秦岭造山带学术讨论会论文选集.西安:西北大学出版社,1991: 99-110.
- [2] 闫臻.西秦岭晚古生代弧前盆地沉积与成矿作用[D].中国科学院研究生院地质与地球物理研究所博士学位论文,2002: 20-50.
- [3] 张国伟,郭安林,姚安平.中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J].地学前缘,2004,11(3): 23-32.
- [4] 张国伟,张宗清,董云鹏,等.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): 101-113.
- [5] 李康宁,李鸿睿,贾儒雅,等.甘肃早子沟金矿“三位一体”找矿预测地质模型的构建[J].矿产勘查,2019,10(6): 1397-1408.
- [6] Qiu K F, Yu H C, Deng J, et al. The giant Zaozigou Au-Sb deposit in West Qinling, China: magmatic or metamorphic hydrothermal origin? [J]. Mineralium Deposita, 2020, 55: 345-362.
- [7] 李建威,隋吉祥,靳晓野,等.西秦岭夏河—合作地区与还原性侵入岩有关的金成矿系统及其动力学背景和勘查意义[J].地学前缘,2019,26(5): 17-32.
- [8] 李康宁,金鼎国,蔡龙,等.早子沟金矿黄铁矿标型特征及其地质意义[J].甘肃地质,2014,23(2): 33-40.
- [9] 刘伯崇,李康宁,史海龙,等.西秦岭甘青交界一带晚三叠世火山岩岩石成因及构造指示意义[J].现代地质,2018,32(4): 704-717.
- [10] 张克信,朱云海,林启祥,等.青海同仁县隆务峡地区首次发现镁铁质—超镁铁质岩带[J].地质通报,2007,26(6): 661-667.
- [11] 邓晋福,冯艳芳,狄永军,等.中国侵入岩大地构造图(1: 2500000)[M].北京:地质出版社,2016: 1-100.
- [12] 秦江锋.秦岭造山带晚三叠世花岗岩类成因机制及深部动力学背景[D].西北大学博士学位论文,2010: 1-173.
- [13] 高婷.西秦岭西段北部重要侵入体年代学、地质地球化学、形成构造环境及与成矿作用关系[D].长安大学硕士学位论文,2011: 1-82.
- [14] 张宏飞,靳兰兰,张利,等.西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成对基底性质及其构造属性的限制[J].中国科学(D 辑),2005,35: 914-926.
- [15] 陈明辉,郭素雄,徐军伟,等.德乌鲁岩体内外接触带金多金属成矿区成岩成矿地质地球化学特征及成因探讨[J].矿产与地质,2016,30(4): 518-530.
- [16] 陈国忠,梁志录,王建龙,等.早子沟金矿岩石地球化学特征及其地质意义[J].甘肃地质,2012,21(4): 23-31.
- [17] Le Maitre R W. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms[M]. Blackwell, Oxford, 1989: 1-193.
- [18] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 63-81.
- [19] 邓晋福,刘翠,冯艳芳,等.高镁安山岩/闪长岩类(HMA)和镁安山岩/闪长岩类(MA): 与洋俯冲作用相关的两类典型的火成岩类[J].中国地质,2010,37(4): 1112-1118.
- [20] 邓晋福,冯艳芳,狄永军,等.岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换[J].

- 地质论评, 2015, 61(3): 473–484.
- [21] O' Connor J T, classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios[J]. United States Geological Survey Professional Paper, 1965, 525B: 79–84.
- [22] 李康宁, 刘伯崇, 狄永军. 三叠纪西秦岭西北部洋俯冲的记录: 来自镁安山岩/高镁安山岩的证据[J]. 中国地质, 2020, 47(3): 350–365.
- [23] Wyllie P J. Constraints imposed by experimental petrology on possible and impossible magma sources and products [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1984, A310(1514): 439–453.
- [24] 李康宁, 金鼎国, 蔡龙, 等. 早子沟金矿黄铁矿标型特征及其地质意义[J]. 甘肃地质, 2014, 23(2): 33–40.
- [25] 姜琪, 王荣超, 甘肃枣子沟金矿床形成环境及矿床成因[J]. 黄金科学技术, 2010, 18(4): 37–40.
- [26] 靳晓野. 西秦岭夏河—合作地区老豆金矿床成因的地球化学和同位素年代学制约[D]. 中国地质大学(武汉)硕士学位论文, 2013: 1–144.
- [27] 刘勇. 甘肃省枣子沟金矿中酸性脉岩与金成矿关系研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2012: 1–72.
- [28] 曹晓峰, Mohamed Lamine Salifou Sanogo, 吕新彪, 等. 甘肃枣子沟金矿床成矿过程分析——来自矿床地质特征、金的赋存状态及稳定同位素证据[J]. 吉林大学学报, 2012, 42(4): 1039–1054.
- [29] 陈国忠, 张愿宁, 梁志录, 等. 利用包裹体测温资料估算早子沟金矿成岩成矿压力及 pH、Eh 值[J]. 甘肃地质, 2014, 23(4): 23–32.
- [30] Taylor H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposit [J]. Econ. Geol., 1974, 69: 843–883.
- [31] Zhang H F, Jin L L, Zhang L, et al. Geochemical and Pb–Sr–Nd isotopic compositions of granitoids from western Qinling belt: Constraints on basement nature and tectonic affinity [J]. Science in China: Earth Sciences, 2007, 50(2): 184–196.
- [32] Meng Q R, Wang E, Hu J M. Mesozoic sedimentary evolution of the northwest Sichuan basin: Implication for continued clockwise rotation of the South China block[J]. Geological Society of America Bulletin, 2005, 117(3/4): 396–410.
- [33] Li X W, Mo X X, Yu X H, et al. U–Pb zircon geochronology, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic compositions of the Early Indosinian Tongren Pluton in West Qinling: Petrogenesis and geodynamic implications? [J]. Lithos, 2013, 172: 158–174.
- [34] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre–Mariam M, et al. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13: 7–27.
- [35] 张旗, 殷先明, 殷勇, 等. 西秦岭与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的金铜成矿及找矿问题[J]. 岩石学报, 2009, 25(12): 3103–3122.
- [36] 殷勇, 赵彦庆. 甘肃西秦岭金矿富集区花岗岩与金成矿作用的关系[J]. 甘肃地质, 2006, 15(1): 36–41.
- [37] 殷勇, 殷先明. 西秦岭北缘与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的斑岩型铜–钼–金成矿作用[J]. 岩石学报, 2009, 25(5): 1239–1252.
- [38] 徐学义, 李婷, 陈隽璐, 等. 西秦岭西段花岗岩浆作用与成矿[J]. 西北地质, 2012, 45(4): 76–82.
- ① 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院. 甘肃省夏河县加甘滩金矿资源储量核实暨扩大区详查报告. 2015.
- ② 湖南省有色地质勘查局二四五队. 甘肃省合作市以地南铜金矿补充详查报告(2012–2014). 2015.
- ③ 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院. 甘肃省合作市早子沟金矿接替资源勘查报告. 2016.
- ④ 中国地质大学(武汉)地质调查研究院. 1: 25 万《临夏幅》报告. 2006.
- ⑤ 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院. 甘肃省合作—美武一带 1: 5 万矿产远景调查报告. 2013.
- ⑥ 陈正乐, 韩凤彬, 王功文, 等. 甘肃省合作市早子沟金矿找矿预测研究. 中国地质科学院地质力学研究所, 2015.